

TRABAJO FIN DE GRADO

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PROCESO DE BRUÑIDO  
CON BOLA EN DIVERSOS MATERIALES**



**Memoria**

**Autor:** Ivan González Alonso  
**Director:** Jordi Llumà i Fuentes  
**Convocatoria:** Enero 2018



## Resumen

Este trabajo tiene por objetivo fundamental optimizar los parámetros de un proceso de bruñido con bola asistido por vibraciones en tres metales diferentes: un acero, un aluminio y un bronce. Además, se pretende relacionar el conjunto de valores óptimos con las propiedades del material, con tal de poder generar una propuesta de valores para realizar bruñidos en otros materiales. Los parámetros que se han tratado de optimizar son la fuerza de bruñido, la velocidad de avance, el paso lateral y la amplitud de la vibración.

Por un lado se han realizado ensayos de dureza, tanto Vickers como Brinell. El primero de ellos, con propósito únicamente analítico: obtener valores de dureza reales. El segundo, con el objetivo de encontrar una relación entre la dureza del material y el paso lateral de bruñido, valiéndose de las similitudes entre ensayo y el bruñido.

Por otro lado, en lo que se refiere al bruñido, se ha partido de datos proporcionados por profesores de la facultad en sus tesis. Mediante el algoritmo SIMPLEX, se han optimizado hasta obtener un conjunto de valores para cada uno de los tres materiales. A partir de aquí, se ha procedido a estudiar la relación entre los resultados obtenidos y las propiedades de estos materiales.

Los resultados nos llevan a la conclusión que tanto la fuerza como el paso lateral son los parámetros más significativos e influyentes en la rugosidad resultante. Por otro lado, la fuerza está fuertemente relacionada con la dureza Brinell del material, mientras que el paso lateral no ha sido posible relacionarlo con ninguna propiedad que ofrezca garantías suficientes para poder generar una propuesta de valores óptima para futuros bruñidos.

## Resum

Aquest treball té per objectiu fonamental optimitzar els paràmetres d'un procés de brunyit amb bola assistit per vibracions en tres metalls diferents: un acer, un alumini i un bronze. A més, es pretén relacionar el conjunt de valors òptims amb les propietats del material, per poder generar una proposta de valors per fer brunyits en altres materials. Els paràmetres que s'han tractar d'optimitzar són la força de brunyit, la velocitat d'avanç, el pas lateral y l'amplitud de la vibració.

Per un costat, s'han dut a terme també assajos de duresa, tant Vickers com Brinell. El primer d'ells, amb objectiu únicament analític: obtenir valors de duresa reals. El segon, amb l'objectiu de trobar una relació entre la duresa del material y el pas lateral de brunyit, valent-se de les similitude de l'assaig y el procés de brunyit.

D'altra banda, pel que fa el brunyit, s'ha partit de dades proporcionades per professors de la facultat en les seves tesis. Mitjançant l'algoritme SIMPLEX, s'han optimitzat fins a tenir un conjunt de valors per a cada un dels tres materials. A partir d'aquí, s'ha procedit a estudiar la relació entre els resultats obtinguts y les propietats d'aquests materials.

Els resultats ens porten a la conclusió que tant força com el pas lateral son els paràmetres més influents en la rugositat resultant. D'altra banda, la força està fortament relacionada amb la duresa Brinell del material, mentre que el pas lateral no ha estat possible relacionar-lo amb cap propietat que ofereixi garanties suficients per poder generar una proposta de valors òptima per a futurs brunyits.

## **Abstract**

The main objective of this project is the optimization of the ball burnishing process parameters with the introduction of vibration, for three different metals: steel, aluminium and bronze. In addition, it is intended to find a relationship between the optimized values and material properties, in order to make a proposal for future burnishing in other materials. The parameters that have been optimized are the burnishing force, feed rate, lateral feed rate and amplitude of vibration.

On the one hand, Vickers and Brinell hardness test have been carried out. The first one, with the aim of obtaining real hardness values. The second one, in order to find a relationship between material hardness and lateral feed rate, taking advantage of the similarities between this test and ball burnishing.

On the other hand, regarding burnishing, the parameter's data has been given by the thesis of professors of the University. Through SIMPLEX algorithm, they have been optimized until obtaining a set of values for each of the three materials. From that moment, the relationship between the set of values and materials properties has been studied.

The results take us to conclude that force and lateral feed rate are the most influential parameters in final surface roughness. A part from that, force is strongly related with Brinell Hardness, while lateral feed has not been possible to relate to any material property offering enough reliability to make a proposal of optimal values for future burnishing.

## Agradecimientos

Quiero mostrar mi agradecimiento a lo largo de la realización de este trabajo, en primer lugar, a Jordi Llumá, director del mismo, cuya ayuda e implicación agradezco enormemente.

Por otro lado, agradecer también el tiempo y dedicación a Ramón Jerez en el taller de la facultad, prestando su ayuda y conocimientos en todos los ensayos realizados.

Y por último, agradecer la paciencia, comprensión y soporte por parte de mi familia y la gente que me rodea.

## Nomenclatura

$F$	Fuerza de bruñido
$V_a$	Velocidad de avance de la herramienta
$b$	Paso lateral
$N$	Número de pasadas
$A$	Amplitud de la vibración
$R_a$	Rugosidad superficial media aritmética
$n$	Revoluciones por minuto (rpm) de la herramienta
$V_c$	Velocidad de corte de la herramienta
$a$	Avance
$a_z$	Avance por diente
$L_{mec}$	Longitud de mecanizado
$f$	Frecuencia de vibración
$k$	Constante del muelle de la herramienta
$\rho$	Densidad del material de la probeta
$E$	Módulo de Young
$R_x$	Rugosidad (genérico)
$R_q$	Rugosidad media aritmética
$Z_i$	Rugosidad parcial
$R_{max}$	Rugosidad máxima
$R_z$	Rugosidad media a partir de $Z_i$
$R_t$	Profundidad total de la rugosidad
$R_p$	Cresta de mayor perfil
$HV$	Dureza en escala Vickers
$HB$	Dureza en escala Brinell
$\sigma$	Tensión
$\epsilon$	Deformación longitudinal
$R_{p0,2\%}$	Límite elástico
$\sigma_{max}$	Tensión máxima de rotura
$D$	Diámetro
$\Delta$	Incremento
$P$	Fuerza aplicada en ensayo Vickers
$t$	Tiempo
$K$	Constante de ensayo
$d$	Diámetro de huella





# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>I</b>
<b>RESUM</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>IV</b>
<b>NOMENCLATURA</b>	<b>V</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Cuestionamientos previos .....	2
1.2. Objetivos y alcance del trabajo .....	2
1.2.1. Objetivos específicos.....	2
<b>2. CONCEPTOS PREVIOS</b>	<b>3</b>
2.1. Rugosidad superficial .....	3
2.2. Dureza.....	7
2.3. Más propiedades mecánicas relevantes .....	8
2.3.1. Módulo de Young .....	8
2.3.2. Límite elástico.....	9
2.3.3. Tensión máxima de rotura .....	9
<b>3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE BRUÑIDO CON BOLA.</b>	<b>10</b>
3.1. Qué es el bruñido con bola? .....	10
3.2. Bruñido asistido por vibraciones.....	11
3.3. Parámetros del proceso de bruñido con bola. ....	11
3.3.1. Fuerza .....	11
3.3.2. Velocidad de avance.....	11
3.3.3. Paso lateral .....	11
3.4. Ventajas e inconvenientes de este tipo de procesos .....	12
<b>4. MÁQUINAS UTILIZADAS</b>	<b>14</b>
4.1. Máquina CNC.....	14
4.2. Herramientas.....	15
4.2.1. Fresa frontal. ....	15
4.2.2. Herramienta de bruñido con bola.....	15

4.3.	Generador de ultrasonidos.....	17
4.4.	Rugosímetro.....	18
4.4.1.	Cutoff.....	18
<b>5.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>20</b>
5.1.	Ensayos de dureza.....	20
5.2.	Definición de parámetros de entrada de cada bruñido.....	20
5.3.	Código CNC.....	20
5.4.	Operaciones previas al bruñido y toma de datos.....	21
5.4.1.	Calibración del rugosímetro.....	21
5.4.2.	Sistema de fijación de la probeta.....	21
5.4.3.	Fresado previo.....	22
5.5.	Operación de bruñido y medición de la rugosidad.....	22
5.6.	Optimización de parámetros mediante SIMPLEX.....	23
5.7.	Criterio de convergencia.....	24
<b>6.</b>	<b>DUREZA .....</b>	<b>25</b>
6.1.	Método de dureza Vickers.....	25
6.1.1.	Condiciones de ensayo mediante durómetro Vickers.....	26
6.1.2.	Resultados.....	27
6.2.	Método de dureza Brinell.....	29
6.2.1.	Condiciones de ensayo mediante durómetro Brinell.....	30
6.2.2.	Resultados.....	31
<b>7.</b>	<b>OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO DE BRUÑIDO CON BOLA EN DIVERSOS MATERIALES. ....</b>	<b>32</b>
7.1.	Primer ensayo: Optimización de los parámetros del proceso de bruñido con bola en acero UNS G10380.....	32
7.1.1.	Características de la probeta.....	32
7.1.2.	Fresado previo.....	33
7.1.3.	Bruñido.....	34
7.1.4.	Datos de partida.....	35
7.1.5.	Resultados.....	35
7.1.6.	Análisis de los resultados.....	36
7.2.	Segundo ensayo: Optimización de los parámetros del proceso de bruñido con bola en Aluminio UNS A92017.....	37
7.2.1.	Características de la probeta.....	37

7.2.2.	Fresado previo .....	38
7.2.3.	Bruñido .....	38
7.2.4.	Datos de partida .....	39
7.2.5.	Resultados .....	40
7.2.6.	Análisis de resultados .....	40
7.3.	Tercer ensayo: Optimización del proceso de bruñido con bola en Bronce UNS C62300. 41	
7.3.1.	Características de la probeta.....	41
7.3.2.	Fresado previo .....	42
7.3.3.	Bruñido .....	42
7.3.4.	Datos de partida .....	44
7.3.5.	Resultados .....	45
7.3.6.	Análisis de los resultados .....	45
7.4.	Verificación de variación de la amplitud.....	47
<b>8.</b>	<b>RELACIÓN DE RESULTADOS Y PROPIEDADES DEL MATERIAL _____</b>	<b>48</b>
8.1.	Fuerza .....	48
8.1.1.	Análisis de resultados .....	50
8.2.	Paso lateral .....	51
8.2.1.	Análisis de los resultados .....	53
8.3.	Dureza Brinell y paso lateral .....	53
<b>9.</b>	<b>ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL _____</b>	<b>55</b>
9.1.	Consumo de energía .....	55
9.2.	Gestión de residuos.....	56
<b>10.</b>	<b>CONCLUSIONES _____</b>	<b>57</b>
<b>11.</b>	<b>ANÁLISIS ECONÓMICO _____</b>	<b>58</b>
<b>12.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA _____</b>	<b>59</b>



# 1. Introducción

Actualmente, con la evolución tan frenética de la industria, la necesidad por mejorar en cualquier ámbito está más presente que nunca. Existen multitud de elementos industriales que requieren de ciertas características técnicas para su óptimo funcionamiento, como un buen acabado superficial o una alta resistencia, entre otras. Ejemplos claros son matrices de conformación, moldes para inyección de plásticos, componentes para maquinaria, herramientas, etc. Ciertas partes de estos elementos pueden presentar una serie de problemas a la hora de trabajar en ellos para conseguir los valores adecuados de rugosidad, tolerancias o dureza superficial.

Con procesos como el bruñido con bola, la dificultad de los procesos necesarios para alcanzar una buena rugosidad superficial, ajustar tolerancias geométricas concretas o conseguir grados de dureza superficiales óptimos, es menor. En piezas planas, cilíndricas o de geometría sencilla, un buen acabado superficial puede ser elaborado de manera relativamente fácil en una rectificadora, por ejemplo. En el momento en que se nos presenta una pieza con una geometría más compleja, surge la necesidad de recurrir a otro tipo de procesos, como el que se trata en este trabajo.

El bruñido con bola es una operación de acabado superficial mediante un proceso de deformación plástica de las irregularidades de la superficie, logrando que el excedente de material de las crestas ocupe los valles de las mismas. Este sistema de fabricación es una opción sencilla y económicamente asequible, presentando a la vez mejoras importantes en acabados superficiales. Además, es posible realizarla de manera automatizada en la misma máquina donde se elabora la pieza en cuestión. En la Figura 7, se muestra un esquema del proceso. (1)

## 1.1. Cuestionamientos previos

Mediante un proceso de deformación plástica, como es el bruñido con bola, es posible mejorar el acabado superficial.

- ¿Es posible establecer un conjunto de parámetros de proceso óptimos para una serie de materiales?
- ¿Se puede establecer una relación entre los parámetros optimizados de proceso, y las características del material bruñido?

A partir de estos cuestionamientos se definen una serie de objetivos para este trabajo.

## 1.2. Objetivos y alcance del trabajo

El objetivo fundamental de este trabajo es determinar el conjunto de parámetros de operación que resulten en un mejor acabado superficial de la pieza que se mecaniza. Se estudiará el resultado del proceso en diferentes materiales y con diferentes parámetros para intentar relacionarlos con las características principales del material en cuestión.

### 1.2.1. Objetivos específicos.

- Planificar una serie de ensayos para diferentes materiales, en base a unos valores de partida obtenidos de diversas fuentes contrastadas.
- Diseñar el código de CNC para la ejecución de la misma, y llevarla a cabo.
- Tratamiento de datos y resultados al mismo tiempo con algoritmo de optimización SIMPLEX.
- Análisis de resultados y establecimiento de conjunto de parámetros óptimos.
- Relación de resultados con características principales del material.

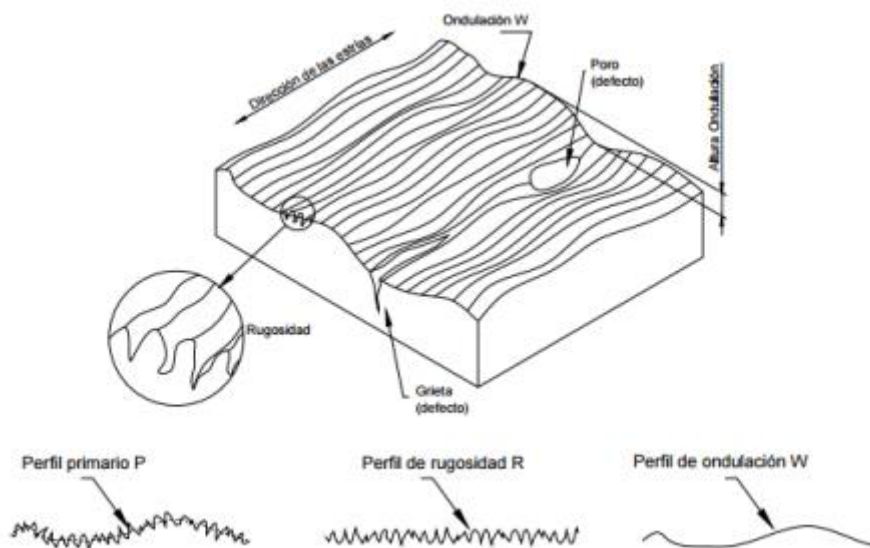
## 2. Conceptos previos

### 2.1. Rugosidad superficial

La rugosidad superficial de una pieza de ámbito industrial queda definida en base a la función que debe realizar. Esta propiedad es un factor importante en el diseño de una pieza, e influye de manera significativa en el comportamiento de la misma, así como en su resistencia al desgaste y a la fatiga, estanqueidad, lubricación, entre otros.

Se define rugosidad superficial como el conjunto de irregularidades que posee una superficie. Partiendo de la base de una pieza mecanizada y, por lo tanto, habiendo corregido los errores de forma y ondulaciones que provienen de los procesos de fabricación (laminación, fundición, forja, etc), la rugosidad depende, en su mayor parte, de los parámetros del proceso de mecanizado llevado a cabo, como la geometría de la herramienta de corte, su velocidad de avance y la profundidad de corte. En el Sistema Internacional (SI) la unidad de rugosidad es el micrómetro ( $1\mu m = 0,001mm$ ).

Según el grado y forma de la rugosidad consecuencia de los procesos de fabricación, se define el perfil primario P, el perfil real de la rugosidad, que puede descomponerse en dos curvas: el perfil de ondulación W y el perfil de rugosidad R (Figura 1: Perfiles de rugosidad ). El perfil W es un perfil en forma de onda que se debe a los desajustes y vibraciones de la máquina, mientras que el perfil R es más escarpado y se debe a las características e imperfecciones del sistema de corte. (2)



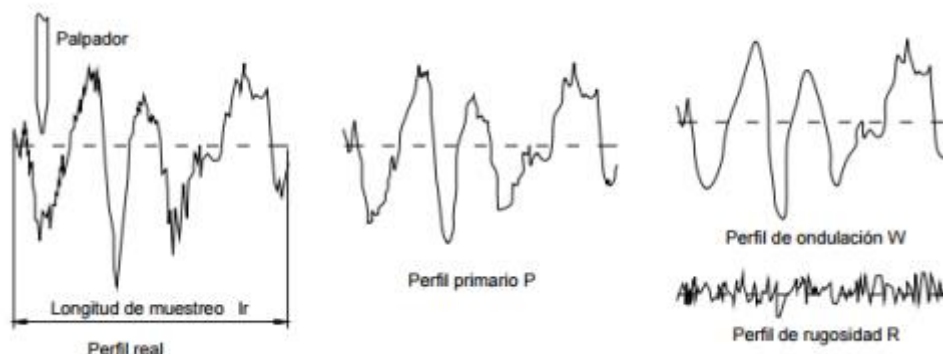


Figura 1: Perfiles de rugosidad (2)

Existen dos sistemas de medición de la rugosidad. El sistema “E” o de la envolvente tiene por base las líneas envolventes descritas por los centros de los círculos que ruedan sobre el perfil efectivo. El sistema “M” o de la línea media se basa en las desviaciones en relación a una forma ideal, tomando como línea de referencia la Línea Media. Este trabajo se sirve de este sistema para realizar todas las mediciones.

El concepto de Línea Media se define como la línea localizada en la parte media del perfil de rugosidad, de forma que la suma de las áreas que quedan por encima sean exactamente iguales a la suma de las áreas que quedan por debajo.

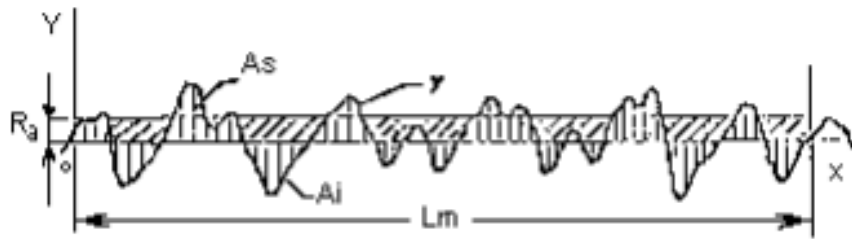
Los parámetros de rugosidad basados en la Línea Media, se agrupan en tres tipos distintos:

- Los basados en la medida de la profundidad de la rugosidad.
- Los basados en medidas horizontales.
- Los basados en medidas proporcionales. (3)

Este estudio trabaja con el primer grupo de parámetros de rugosidad. Dentro de este grupo, se encuentran definidos los parámetros mediante  $R_x$ , siendo el subíndice  $x$  el método de cálculo que se utiliza para cuantificar la rugosidad. El parámetro más utilizado para indicar la rugosidad de una pieza es  $R_a$ , estandarizado y tomado como referencia por la normativa internacional para indicar tolerancias superficiales en planos de fabricación.

$R_a$ , o Rugosidad media aritmética, se define como la media aritmética de los valores absolutos de las coordenadas de los puntos del perfil de rugosidad en relación a la Línea Media dentro de la longitud de medición  $L_m$  (Figura 2).



Figura 2: Esquema representativo de  $R_a$ . (3)

Este parámetro queda definido analíticamente como la altura de un rectángulo cuya área sea igual a la suma absoluta de las áreas delimitadas entre el perfil de rugosidad y la Línea Media, siendo la longitud de medición  $L_m$ .

$$R_a = \frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} |y| dx$$

Ecuación 1: Cálculo de  $R_a$ 

De forma aproximada, es posible determinar el valor de  $R_a$  mediante un cierto número  $n$  de ordenadas de puntos de perfil (prefijado por el tipo de aparato que mide la rugosidad).

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y|$$

Ecuación 2: Cálculo de  $R_a$  aproximado

La determinación del módulo de medición (Cut-off) y la longitud de medición están relacionados con la rugosidad que se desea medir, detallado en la siguiente tabla (Tabla 1):

Rugosidad $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Cut-off (mm)	Longitud de medición (mm)
hasta 0,1	0,25	1,25
0,1 a 2	0,8	4
2 a 10	2,5	12,5
10	8	40

Tabla 1: Relación entre Rugosidad, Cut-off y Longitud de Medición. (3)

Una de las ventajas que presenta el empleo de  $R_a$  como parámetro de rugosidad es que es el más utilizado en todo el mundo, aplicable a la mayoría de procesos de fabricación, además de su sencillez del proceso de medida.

Como contrapartida, el valor de  $R_a$  no define la forma de la irregularidad de un perfil, originando valores de  $R_a$  prácticamente iguales para superficies con distinto acabado superficial.

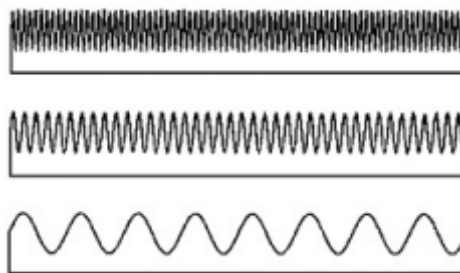


Figura 3: Superficies con mismo Ra pero acabado superficial diferente. (4)

Además de  $R_a$ , existe más sistemas basados en la profundidad de la rugosidad. A continuación se exponen los más utilizados.

- $R_q$ , Rugosidad media cuadrática, definida como la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las ordenadas del perfil efectivo en relación a la Línea Media en un módulo de medición. Utilizado en superficies donde  $R_a$  presenta poca resolución.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} * \int_0^L y^2 dx}$$

Ecuación 3: Cálculo de  $R_q$

- $Z_i$ , Rugosidad parcial, es igual a la suma de las ordenadas (en valor absoluto) de los puntos más alejados de la Línea Media dentro de cada módulo. Utilizado para obtener  $R_{max}$ ,  $R_a$  y  $R_z$ .

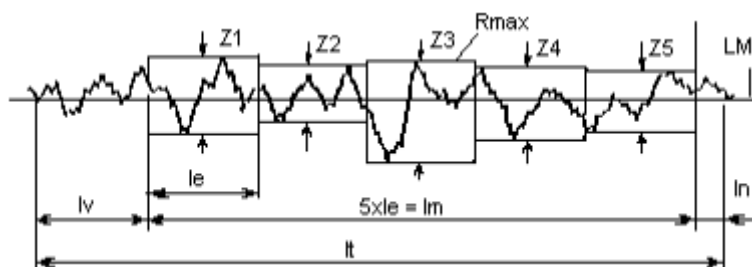


Figura 4: Rugosidad parcial  $Z_i$  (3)

- $R_z$ , Rugosidad media, definida como la media aritmética de los valores de rugosidad parcial  $Z_i$ , que a su vez es la suma de las ordenadas de los puntos más alejados de la línea media dentro de cada módulo. Utilizado en superficies donde el perfil es periódico y conocido.

$$R_z = \frac{1}{5} * (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5)$$

Ecuación 4: Cálculo de  $R_z$

- $R_{max}$ , es la mayor de las rugosidades parciales  $Z_i$  medidas. En la figura 4 corresponde a  $Z_3$ . No caracteriza suficientemente una superficie, ni informa sobre su forma.

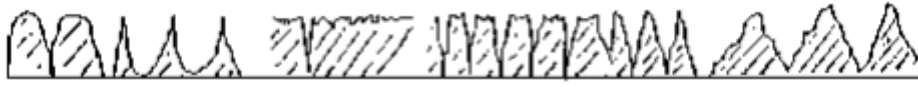


Figura 5:  $R_{max}$  idéntica. (3)

- $R_t$ , profundidad total de la rugosidad. Representa la distancia vertical entre el pico más alto y el valle más profundo dentro de la longitud de medición. Como el parámetro anterior, no caracteriza de manera suficiente una superficie, pero considera la longitud de medición completa, sin despreciar un trecho al comiendo y al final de la carrera del palpador.
- $R_p$ , Cresta mayor del perfil. Es la distancia entre el punto más alto del perfil y la línea media.

## 2.2. Dureza

El concepto de dureza se define como la resistencia que ofrece un material a sufrir deformación plástica superficial debido a penetración, abrasión, rayado u otras formas de deformación permanentes en la superficie. Es una propiedad de la capa superficial del material.

Para cuantificar esta propiedad, existen diversas escalas o formas de cuantificar la dureza de un material dependiendo del instrumento utilizado para realizar el ensayo y de los parámetros del mismo.

En el marco de este trabajo, se trabaja con dureza Brinell y dureza Vickers. Ambos métodos consisten en una penetración controlada mediante un penetrador con una forma determinada. En el primer caso, el ensayo Brinell se realiza mediante una bola esférica de acero o de carburo de wolframio. Por otro lado, el ensayo Vickers utiliza como penetrador un diamante en forma de pirámide regular de base cuadrada. En estos ensayos se mide la profundidad o tamaño de la huella resultante, lo cual se relaciona con un valor de dureza. Las durezas tienen un significado relativo y es necesario tener precaución al comparar durezas obtenidas por técnicas distintas. Cada ensayo tiene sus limitaciones y por ello según el material a ensayar y el grosor, se utiliza un método u otro. (5)

Se denomina durómetro al dispositivo utilizado para realizar los ensayos por penetración. Consiste en un penetrador normalizado accionado por una prensa que realiza una fuerza también

normalizada sobre la superficie del material del que se quiere conocer la dureza. En general, el fundamento de estos ensayos es la medición de la huella dejada por el penetrador. Ésta es medida con un microscopio, y finalmente, mediante una expresión matemática se calcula el valor de dureza.

## 2.3. Más propiedades mecánicas relevantes

En este trabajo, se trabaja con diferentes propiedades mecánicas del material, como describen los objetivos establecidos. A continuación se describen brevemente los más relevantes.

### 2.3.1. Módulo de Young

El módulo de elasticidad  $E$  o módulo de Young, es un parámetro característico de cada material que indica la relación existente entre los incrementos de tensión aplicados ( $d\sigma$ ) en el ensayo de tracción y los incrementos de deformación longitudinal unitaria ( $d\varepsilon$ ) producidos (en la zona de comportamiento elástico de dicho material).

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

Ecuación 5: Módulo de Young

Equivalente a la tangente en cada punto de la zona elástica en la gráfica tensión-deformación obtenida del ensayo de tracción. El módulo de elasticidad indica la rigidez de un material. Cuanto más rígido es un material mayor es su módulo de elasticidad. (6)

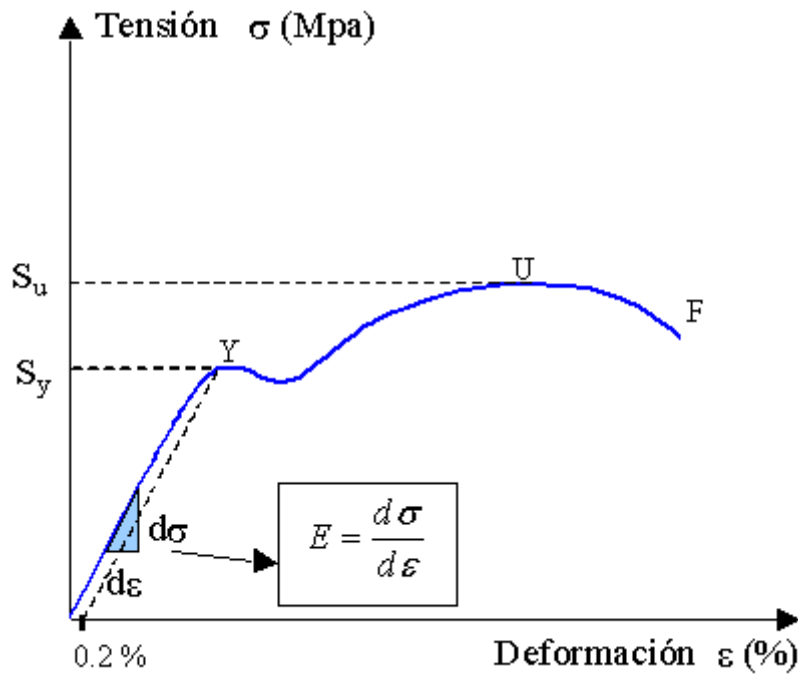


Gráfico 1: Tensión – Deformación (6)

### 2.3.2. Límite elástico

El límite de fluencia (o límite elástico) de un material se define como la tensión existente en la sección de una probeta normalizada de dicho material, sometida a un ensayo de tracción o a un ensayo de compresión, en el instante en que se inicia la fluencia o deformación plástica del mismo.

En algunos materiales no se aprecia claramente el límite de fluencia a partir de la curva del ensayo de tracción, por lo que por convenio se establece como límite de fluencia la tensión para la que la deformación longitudinal unitaria permanente alcanza el 0.2 %. Representado en el gráfico de la figura 6 como  $S_y$ . (6)

En este trabajo esta magnitud se representa como  $Rp_{0,2\%}$ .

### 2.3.3. Tensión máxima de rotura

El límite de rotura (o resistencia límite de rotura) de un material se define como la tensión máxima alcanzada en la sección de una probeta normalizada de dicho material, sometida a un ensayo de tracción o un ensayo de compresión. Representado en el gráfico de la figura 6 como  $S_u$ . (6)

En este trabajo dicha magnitud se representa como  $\sigma_{max}$ .

### 3. Descripción del proceso de bruñido con bola.

#### 3.1. Qué es el bruñido con bola?

El proceso de bruñido con bola se describe como un proceso tecnológico que consiste en deformar plásticamente las irregularidades superficiales de una pieza previamente mecanizada, aportando mejoras en el acabado superficial, además de incrementos en los valores de dureza y vida útil a fatiga. En este trabajo se trata de optimizar los parámetros de operación de este proceso e intentar encontrar la relación entre éstos y las características del material.

Este proceso se sirve de una herramienta que ejerce una fuerza mediante una bola para aplastar las crestas de las irregularidades de la superficie de la pieza. A diferencia de procesos como el rectificado, el abanico de posibilidades debido a la propia naturaleza del proceso es mucho más amplio. Permite mejorar el acabado superficial en superficies planas, cilíndricas, cónicas y cambios de sección, por ejemplo. Puede aportar soluciones a la industria, con la mejora de la rugosidad de componentes mecánicos, máquinas-herramienta, moldes de inyección y matrices de conformación, entre otros.

En la Figura 6: Diagrama esquemático del proceso de bruñido con bola. (Fang-Jung Shiou & Cheng-Hua Chen, 2003) se puede observar un esquema gráfico del proceso. En la parte izquierda se observa el perfil obtenido tras un proceso de mecanizado por arranque de virutas. Estas crestas las originan las cuchillas que mecanizan la superficie. En la parte derecha, se observa el perfil ya mecanizado por la herramienta de bruñido con bola, donde se aprecia la disminución de altura de las crestas y la deposición del material de éstas en los valles, logrando una altura pico-valle menor y, por consiguiente, una rugosidad inferior.

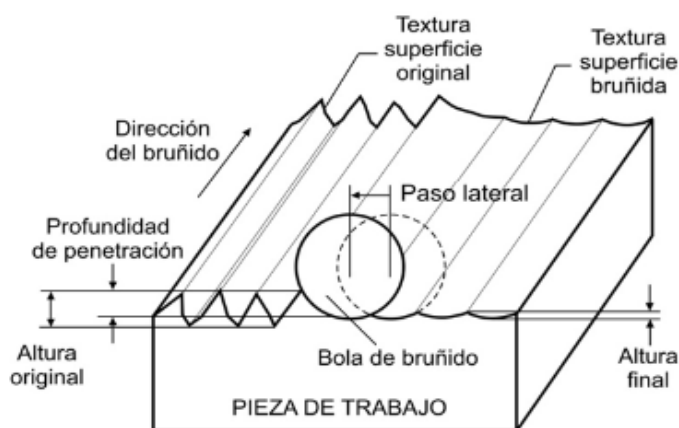


Figura 6: Diagrama esquemático del proceso de bruñido con bola.  
(Fang-Jung Shiou & Cheng-Hua Chen, 2003) (1)

### **3.2. Bruñido asistido por vibraciones.**

En la actualidad existen vías alternativas en búsqueda de la mejora de resultados en procesos de fabricación tradicionales. Además de la optimización de parámetros de estos procesos, existen diferentes métodos para asistirlos, ofrecidos por los continuos avances que ofrece la tecnología. Destaca la introducción del láser, de vibraciones, de pulsos de corriente, etc., que contribuyen en gran medida a mejorar los resultados obtenidos por los métodos tradicionales.

La variedad de herramientas asistidas disponibles en el mercado es amplia, así como los procesos que se han beneficiado de esta optimización, razón por la cual se ha decidido trabajar con una cuyo método de asistencia sean las vibraciones ultrasónicas. (7)

### **3.3. Parámetros del proceso de bruñido con bola.**

Para cada tipo de operación de mecanizado existe una serie de parámetros que lo caracterizan. En el caso del bruñido con bola, y más concretamente en este trabajo, los relevantes son la fuerza aplicada, la velocidad de avance de la herramienta y el paso lateral. Además, se incluye un generador de ultrasonidos que aporta vibración. Es necesario destacar también, el número de pasadas por bruñido y la estrategia del mismo (considerada como la dirección en la que se desplaza la bola en relación al mecanizado previo).

#### **3.3.1. Fuerza**

La fuerza y como es aplicada por la herramienta se describe en el apartado 154.2.2.

#### **3.3.2. Velocidad de avance**

De la misma forma que en otros procesos de mecanizado como el fresado, la velocidad de avance de la herramienta es la velocidad a la que ésta se desplaza en relación a la pieza, o viceversa. La unidad utilizada es ( $mm/min$ ).

#### **3.3.3. Paso lateral**

Uno de los parámetros más influyentes en el acabado superficial de un material al ser bruñido con bola es la distancia entre dos pasadas consecutivas y paralelas. Este concepto se denomina paso lateral.

A raíz de investigaciones acerca de la influencia de este parámetro en la rugosidad final (7), es posible extraer la conclusión de que de la rugosidad mejora cuando la distancia entre pasadas coincide con la distancia entre el pico de la cresta y el valle efectuado por el bruñido. Si esta

distancia es mayor, no se cubrirá toda la distancia entre pico y valle, encontrando posteriormente zonas sin bruñir y posiblemente con peor rugosidad. En contraposición, si el paso lateral es menor que el ancho de la superficie de contacto efectiva, se actuará en zonas del material ya endurecidas por la deformación plástica sufrida previamente, dificultando la obtención de mejores acabados.

Por otro lado, este parámetro tiene gran influencia en términos de productividad. Dependiendo del ancho del paso lateral, será necesario más o menos tiempo para bruñir una misma superficie.

### 3.4. Ventajas e inconvenientes de este tipo de procesos

El proceso de bruñido aporta ventajas interesantes, según J.A. Travieso, 2010. (8)

- *“Se obtienen muy buenos acabados superficiales”.*
- *“Sustituye operaciones de acabado posteriores que necesitan máquinas herramientas diferentes de la que estaba siendo utilizadas para mecanizar la pieza”.*
- *“Los costes de operación son relativamente bajos”.*
- *“Provoca un endurecimiento superficial en el material trabajado. Este se produce por la reorganización de los granos del material producto del proceso de deformación, durante la cual los mismos se condensan y afinan”.*
- *“Mejora las propiedades físicas y mecánicas de la superficie, logrando aumentar la vida útil de la pieza. Por un lado, aumenta la resistencia al desgaste porque al bruñirse la superficie casi se igualan el tamaño de las crestas y los valles de la topografía, provocando que dicha superficie, al entrar en contacto con otra sufra un desgaste mínimo. Aumenta también la resistencia a la fatiga por la aparición de altas tensiones residuales compresivas que quedan en la capa superficial del material de la pieza, producto del proceso de bruñido. Para que un esfuerzo externo provoque un daño sobre la pieza, éste debe sobrepasar en valor a esos valores de tensiones residuales. Por otro lado también aumenta la resistencia a la corrosión porque al reducirse la porosidad y las marcas de la herramienta, las sustancias reactivas o contaminantes tienen menos posibilidad de atacar y corroer la superficie bruñida”.*
- *“Las diferentes piezas de esta herramienta son intercambiables, por lo que resulta sencillo, fácil y rápido el mantenimiento y el cambio de piezas gastadas o deterioradas tales como las esferas, el casquillo empujador, etc., lo que ayuda a prolongar la vida útil de la herramienta”.*
- *“El proceso es relativamente rápido comparado con otros similares de acabado antes mencionados que tardan más, con lo cual se ahorra tiempo y aumenta la productividad”.*
- *“Es un proceso ecológico, pues no se generan desperdicios sólidos al no haber arranque de virutas. Tampoco produce altos niveles de ruido”.*



- *“Puede realizarse en máquinas herramientas convencionales, fundamentalmente en tornos y fresadoras, así como en máquinas herramienta con control numérico. La precisión del proceso va en función del diseño de la herramienta y de las condiciones de operación de ésta y no de la precisión de la máquina herramienta”. (8)*

## 4. Máquinas utilizadas

Todas las herramientas y maquinaria utilizada en este trabajo se encuentran en el taller de la Escuela de Ingeniería de Barcelona Este (EEBE).

### 4.1. Máquina CNC.

La máquina utilizada para realizar los ensayos es un centro de mecanizado LAGUN MC 600 del Grupo Goratu.

Se trata de una fresadora de CNC de 3 ejes, que cuenta con CNC 8065-M FAGOR. Tiene, además, la posibilidad de cambiar de herramienta automáticamente, así como refrigeración por chorro de taladrina.



Figura 7: Centro de mecanizado LAGUN MC600

#### Dimensiones y capacidades

<b>Recorrido X</b>	600 mm
<b>Recorrido Y</b>	406 mm
<b>Recorrido Z</b>	432 mm
<b>Superficie de la mesa</b>	762 x 381mm
<b>Peso máximo sobre la mesa</b>	350 kg
<b>Velocidad del cabezal</b>	hasta 5000 rpm
<b>Avance rápido</b>	20.000 mm/min
<b>Potencia</b>	11 kW

Tabla 2: Características Lagun MC600

## 4.2. Herramientas.

### 4.2.1. Fresa frontal.

Para preparar la superficie para la operación de bruñido, generalmente se recurre a un fresado en dos etapas: la primera pasada de desbaste, y la segunda de acabado, según el material.



Figura 8: Fresa frontal para Acero UNS G10380

### 4.2.2. Herramienta de bruñido con bola.

La herramienta utilizada para bruñir (Figura 9 y Figura 10) se divide en tres cuerpos: la unidad que regula la fuerza, y donde se encuentra el muelle; la unidad que transmite la vibración, y por último la unidad que transmite la fuerza mediante en una bola de diámetro  $D_{bolabruñido} = 10mm$ . Esta fuerza la genera el muelle situado en el interior de la unidad que la regula, cuyo comportamiento es definido por el Gráfico 2. En este caso, y a diferencia de los procesos de mecanizado, el propio avance de la herramienta es suficiente para llevar a cabo el mecanizando, no siendo necesario un movimiento de giro.

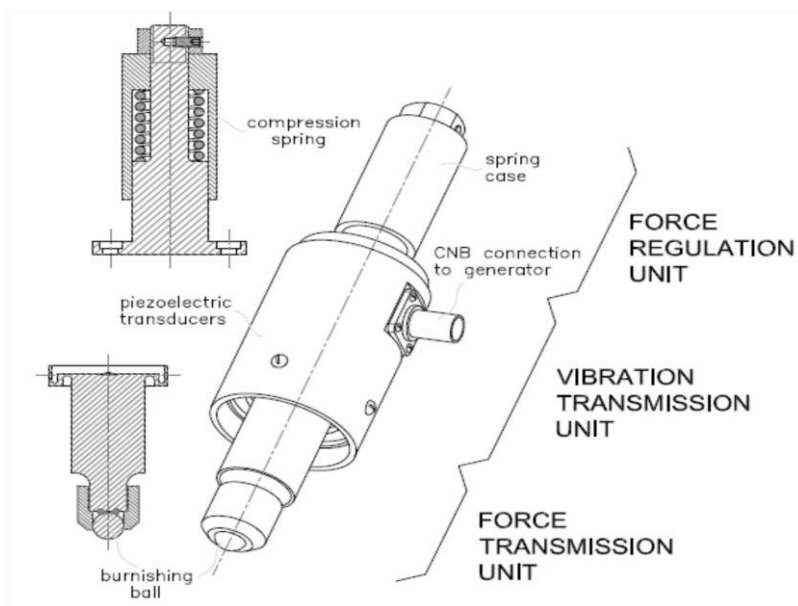


Figura 9: Esquema de la herramienta de bruído. (9)



Figura 10: Imagen de la herramienta de bruído.

Sirviéndonos del asistente de gráficos de Excel, se obtiene la recta de regresión y la función de la misma. De esta forma se obtiene la coordenada Z para cada bruído.

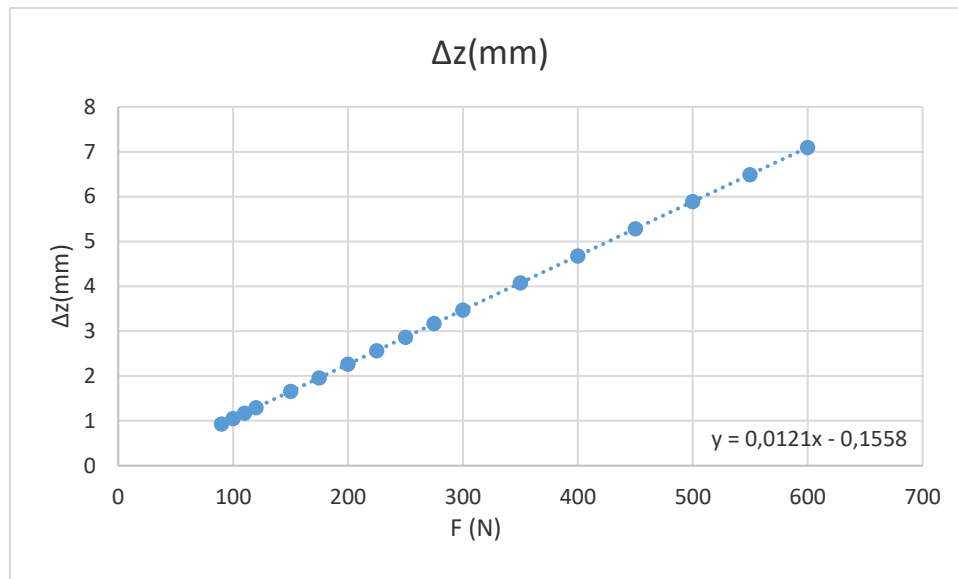


Gráfico 2: Fuerza - Coordenada Z

$$F = F_0 + k * \Delta x$$

Ecuación 6: Ley de Hooke

$$\Delta z = 0.0121 * F - 0.1558$$

Ecuación 7: Cálculo desplazamiento vertical

### 4.3. Generador de ultrasonidos.

Para introducir una variable de entrada más en los ensayos, amplitud de vibración  $A$ , se ha utilizado un generador de ultrasonidos proporcionado por la Universidad. Este aparato permite variar la amplitud de esta vibración, de 0% a 100%, contando con una frecuencia constante.



Figura 11: Generador de ultrasonidos

## 4.4. Rugosímetro.

La herramienta utilizada para medir rugosidades es un rugosímetro *Mitutoyo SJ-210*. Es una unidad portátil con la unidad de medida extraíble que contiene la aguja y el captador, ideal para el propósito de este proyecto, ya que facilita enormemente la toma de medidas al disponer de un aparato de dimensiones contenidas.



Figura 12: Rugosímetro

### 4.4.1. Cutoff

Una de las características del rugosímetro más importantes es la capacidad de cambiar el *cutoff*. Es la distancia que se utiliza para diferenciar rugosidad de desviaciones de ondulación.

Proceso de acabado	Rango de valores de Ra esperados		Valores de cut-off admisibles		
	$\mu\text{m}$	$\mu\text{inch}$	0,25 $\mu\text{m}$ 0,01 $\mu\text{in}$	0,8 $\mu\text{m}$ 0,03 $\mu\text{in}$	2,5 $\mu\text{m}$ 0,1 $\mu\text{in}$
Superacabado	0,025 - 0,20	1 - 0	x	x	
Lapidado	0,025 - 0,40	1 - 16	x	x	
Pulimento	0,025 - 0,40	1 - 16		x	X
Pulido (liso)	0,10 - 0,40	4 - 16		x	X
Bruñido	0,10 - 0,80	4 - 32	x	x	
Esmerilado	0,10 - 1,6	4 - 64	x	x	X
Perforado con Diamante	0,20 - 0,40	8 - 16	x	x	
Torneado con Diamante	0,20 - 0,40	8 - 16	x	x	
Torneado	0,40 - 6,30	16 - 250		x	X
Perforado con Mecha	0,40 - 6,30	16 - 250		x	X
Trefilado	0,80 - 3,20	32 - 125		x	X
Mandrilado	0,80 - 3,20	32 - 125		x	x
Fresado	0,80 - 6,30	32 - 250		x	x
Electroerosión	1,60 - 6,30	64 - 250		x	x
Modelado por Prensa	1,60 - 12,50	64 - 500	x	x	
Aplanamiento	1,60 - 12,50	64 - 500		x	x
Electrodeposición	0,80 - 0,80	8 - 32			x
Fresado químico	1,60 - 6,30	63 - 250	x	x	
Laser	1,60 - 6,30	63 - 250		x	
Aserrado	1,60 - 25,0	63 - 1000		x	x
Extrusión	0,80 - 3,20	32 - 125		x	
Fundición a presión	0,80 - 1,60	32 - 63		x	
Forjado	3,20 - 13,0	32 - 63		x	
Laminación en Caliente	13,0 - 25,0	500 - 1000		x	x
Fundido con molde de arena	13,0 - 25,0	500 - 1000		x	x

Tabla 3: Longitud estándar de cutoff y longitud de evaluación de Ra según proceso de fabricación. (3)

Siguiendo estos parámetros y los valores de Ra en que se mueven los ensayos, la longitud de *cutoff* a utilizar es de  $0,8mm$ .

## 5. Metodología

Para la realización de los ensayos en los que se basará este trabajo se emplearán diferentes probetas de diferentes materiales: acero, aluminio y bronce. El proceso de fabricación de las mismas es un laminado, obteniendo un bruto en forma de barra con un perfil determinado.

### 5.1. Ensayos de dureza

Anteriormente a los ensayos de bruñido que se describen a continuación, se realiza un ensayo de Dureza Vickers y un ensayo de dureza Brinell. Estos dos ensayos se tratan en el apartado 6. *Dureza*, donde queda reflejado todo el contenido relativo a ellos.

### 5.2. Definición de parámetros de entrada de cada bruñido

Para este trabajo se han tomado como referencia las Tesis Doctorales de J.A. Travieso y Giovanni Gómez Gras, tanto información teórica como datos desde los cuáles parten los ensayos de bruñido de este trabajo. También se han tomado datos de referencia para el acero UNS G10380 de Ramón Jerez y el aluminio UNS A92017.

De los datos obtenidos de sus experimentos, se seleccionan los que consiguen mejores rugosidades superficiales, y se establecen como parámetros iniciales para una optimización posterior.

### 5.3. Código CNC

El código CNC utilizado para los experimentos de bruñido ha sido diseñado de forma manual, sin ayuda de software de CAM, debido a la baja complejidad del mismo. Posteriormente, mediante una hoja de Excel, se ha creado un generador de código automático, que facilita su obtención, introduciendo solo los parámetros de entrada del experimento.

Este código tiene en cuenta todos los parámetros de entrada, como la fuerza vertical que ejerce la herramienta contra la pieza, la velocidad de avance de la misma, el paso lateral y las pasadas. La amplitud de la vibración, no obstante, se regula independientemente con el generador de ultrasonidos. Mediante bucles, se consigue compactar el código de manera drástica, ganando en tiempo y eficiencia en los ensayos.



A continuación se muestra un ejemplo de código CNC para el bruñido de un área de 7x7mm, detallando qué acción lleva a cabo cada línea. Cabe destacar que previamente se determina el cero máquina y el cero pieza. El primero de estos dos procesos lo realiza la máquina automáticamente, y el segundo requiere que el operario introduzca las coordenadas.

N15 G01 X-2,5 Y2,5 Z1	Se inicia el bucle y se desplaza la herramienta al punto inicial de bruñido
G01 Z-2,2642	Se desplaza la herramienta a la altura equivalente a la fuerza a aplicar por la herramienta.
N20 G91 G01 X0 Y7	Inicio bucle que cubre los 7mm de ancho de la huella. Se pasa a coordenadas relativas, y se desplaza la herramienta a Va determinada. Movimiento en Y+.
F300	
X0,2 Y0	Movimiento en X+.
X0 Y-7	Movimiento en Y-.
X0,2 Y0	Movimiento en X+.
[L#20]	Final de bucle.
#RPT[N20,[L#20],17]	Repetición de bucle desde N20 a L#20 hasta cubrir el ancho de la huella.
G01 G90 Z10	Paso a coordenadas absolutas y desplazamiento en Z+ de la herramienta.
[L#15]	Final de bucle.
#RPT[N15,[L#15],2]	Repetición de bucle desde N15 a L#15 hasta cubrir dos pasadas.

## 5.4. Operaciones previas al bruñido y toma de datos.

### 5.4.1. Calibración del rugosímetro.

Para calibrar el dispositivo se han seguido los pasos especificados por el fabricante.

- Se utiliza un patrón de calibración con una rugosidad  $Ra = 2,800\mu m$ .
- Mediante los submenús del rugosímetro, se hace una medición y se obtiene un valor.
- Posteriormente, habrá que ajustar este valor al de la rugosidad del instrumento calibrado.

Se ajusta también, el *cutoff* con el que se medirá, descrito en el apartado 4.4.1, y cuyo valor aparece destacado en la Tabla 3. Longitud estándar de cutoff y longitud de evaluación de  $Ra$  según proceso de fabricación..

### 5.4.2. Sistema de fijación de la probeta

Las piezas utilizadas tienen formas regulares y se fijan a la bancada mediante mordazas (Figura 13). Para asegurar la horizontalidad de la pieza, se han utilizado unos calzos calibrados para tal efecto.



Figura 13: Mordaza

#### 5.4.3. Fresado previo

Con el objetivo de asegurar una superficie de partida adecuada y con una rugosidad superficial inicial aceptable, se fresa la superficie de la probeta. Esto consigue, además, una superficie totalmente horizontal y paralela al plano X-Y de la máquina.

Dependiendo del material a ensayar en cada experimento, se variarán los parámetros de esta operación de mecanizado, así como la herramienta.

### 5.5. Operación de bruñido y medición de la rugosidad.

Después de fresar la pieza, se procede a bruñir la pieza en pequeñas áreas con la herramienta descrita en apartado 4.2.2. Los parámetros de operación de cada bruñido se recalculan en cada iteración mediante el algoritmo descrito en el apartado 5.6.

A continuación, se coloca el soporte (Figura 14) con la extensión del rugosímetro y se toman los datos de rugosidad necesarios. El número de medidas se ha determinado para asegurar que el error estadístico se sitúa por debajo de 0,1 (apartado 5.7). Se retira el soporte y se repite el proceso de nuevo.



Figura 14: Medición de rugosidad

## 5.6. Optimización de parámetros mediante SIMPLEX.

El método Simplex es un procedimiento iterativo que permite mejorar la solución en cada paso. El procedimiento finaliza cuando ya no es posible mejorar ésta o se cumple el criterio de convergencia establecido. Este algoritmo se caracteriza por su robustez, pero a la vez por su poca rapidez de convergencia. Su comportamiento, por otro lado, es sencillo, distinguiendo cuatro comportamientos distintos (Figura 15).

Este algoritmo toma un vértice aleatorio de la función objetivo  $F$  e intenta repetidamente encontrar otro vértice cuyo valor mejore el anterior. Mediante el polígono que forman los puntos de los que partimos, intenta “acorrallar” el óptimo. En cada iteración, existe la posibilidad de encontrar con que el punto que se busca esté dentro del polígono o no. En caso afirmativo, el algoritmo se contrae cada vez más hasta lograr convergencia. En caso negativo, puede expandirse o efectuar una reflexión al determinar que el punto óptimo no se encuentra dentro del polígono.

En este trabajo, el método Simplex está preparado para minimizar la función objetivo  $F$ , con 5 puntos de partida.

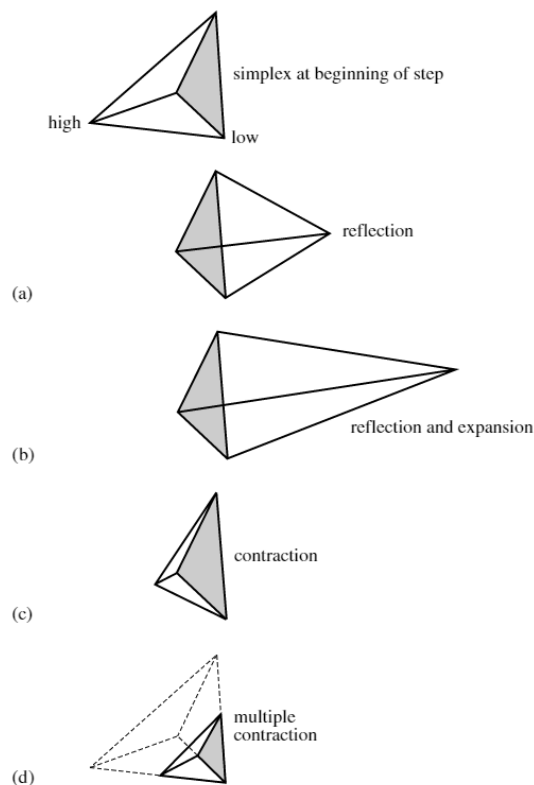


Figura 15: Simplex. A Numerical Recipe, 3rd Edition. Cambridge University Press (2007). (10)

## 5.7. Criterio de convergencia

Es necesario establecer un criterio de convergencia que satisfaga un cierto grado de precisión en los resultados. Para ello, se determina el error asociado a la medida con el rugosímetro.

En este trabajo, se ha calculado el error asociado del rugosímetro en acero y en aluminio, y en ambos el resultado ha sido prácticamente idéntico. En ambos materiales se bruñó una superficie de 7x7mm, las dimensiones de la huella utilizada en cada ensayo, y se han tomado 15 medidas de rugosidad en todo el ancho de la misma.

Se realiza un gráfico con el número de medidas tomadas y el error asociado. Se observa como con el aumento de medidas disminuye el error de Ra hasta estabilizarse en 0,1.

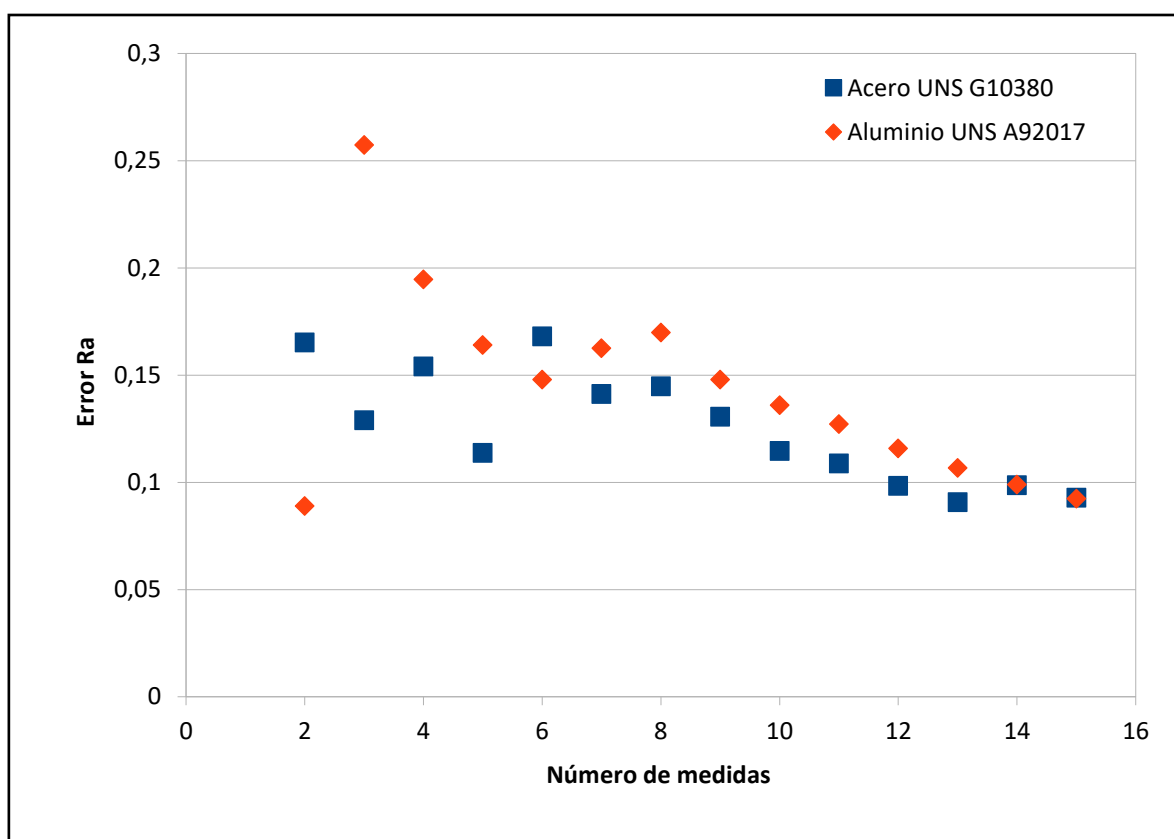


Gráfico 3: Número de medidas vs Error Ra

Estos dos resultados establecen el criterio de convergencia a seguir en los ensayos. Cuando entre el mínimo y el máximo de los resultados, la diferencia sea igual o menor a ese valor, y esta condición se cumpla en tres iteraciones consecutivas, se da por finalizado el ensayo.

Desde otro punto de vista, con estos datos se extrae la conclusión de que es necesario realizar 9 ensayos para asegurar un error de 0,150, y 14 ensayos para asegurar un error de 0,10.

## 6. Dureza

### 6.1. Método de dureza Vickers

Como se menciona en el apartado 5.1, se procede a estudiar la dureza de las diferentes probetas utilizadas con el objetivo de obtener un valor de dureza real de las probetas ensayadas. Para ello, se realiza un ensayo de dureza mediante el Durómetro Vickers disponible en el laboratorio de DEFAM en la EEBEst.



Figura 16: Durómetro Vickers

El ensayo Vickers está definido por la norma UNE 7-423-84. Consiste en penetrar sobre la superficie del material con un indentador de diamante con forma de pirámide de base cuadrada, con un ángulo de  $136^\circ$  entre caras opuestas, para posteriormente medir las diagonales de dicha huella después de retirar la carga.

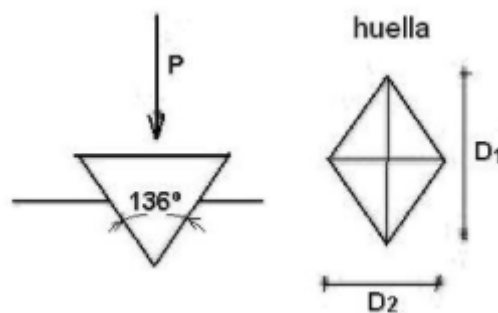


Figura 17: Ensayo de dureza Vickers

El número de dureza de Vickers (HV) relaciona la carga aplicada y el área de la superficie dejada por la huella.

$$HV = \frac{1.854 * P}{D}$$

Ecuación 8: Cálculo dureza HV

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

Ecuación 9: Diámetro promedio

Donde,

- $P$  es la fuerza aplicada en kg.
- $D$  es la diagonal promedio de la huella en mm.

Con este ensayo es posible medir una amplia gama de materiales, desde muy blandos a muy duros, algo que no es posible con el método Brinell, debido a que si su dureza se aproxima a la dureza de la bola, las deformaciones que sufre esta alteran los resultados del ensayo. Además, la huella resultante está bien perfilada, lo que facilita la medición mediante las lentes y la consola de la propia máquina.

#### 6.1.1. Condiciones de ensayo mediante durómetro Vickers

Para la toma de durezas, se siguen las siguientes condiciones de ensayo:

- Ensayo sobre superficie fresada.
- Carga aplicada,  $P = 2 \text{ kg}$ .
- Tiempo de aplicación de la carga,  $t = 10 \text{ s}$ .
- Carga perpendicular a la huella.
- Distancia mínima entre centros de huella es de  $2,5D$ .
- Se realizan 12 medidas de dureza, para obtener un promedio y un error de la misma con una  $t$  de Student que se estabiliza ligeramente por encima de 2.
- Se realizan tomas de dureza en dos zonas de la probeta: lateral y central.

## 6.1.2. Resultados

### 6.1.2.1. Acero UNS G10380

Para el Acero UNS G10380, se ha realizado la toma de dureza en la zona central de la probeta, obteniendo el siguiente resultado:

#### UNS G10380

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (mm)	HV
136,00	137,40	140,11	188,9
134,76	137,54	139,55	190,5
135,12	136,14	139,01	191,9
136,87	137,02	140,36	188,3
135,98	137,99	140,40	188,1
136,12	137,12	140,03	189,1
135,87	137,32	140,00	189,2
136,32	135,21	139,15	191,5

HV	Error
189,7	3,4

Tabla 4: Resultados dureza Vickers en Acero UNS G10380

Es necesario destacar que se tomaron 9 medidas debido a la estabilidad que presentaban los resultados.

### 6.1.2.2. Aluminio UNS A92017

Para el Aluminio UNS A92017, se han realizado tomas de dureza en la zona lateral y central de la probeta, obteniendo el siguiente resultado:

#### UNS A92017 Lateral

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
186,70	187,10	186,90	106,2
193,20	195,00	194,10	98,4
188,30	186,20	187,25	105,8
186,70	183,00	184,85	108,5
181,10	182,00	181,55	112,5
198,40	184,40	191,40	101,2
182,60	178,80	180,70	113,6
188,80	184,70	186,75	106,3
186,60	190,30	188,45	104,4
194,60	193,70	194,15	98,4
194,60	189,40	192,00	100,6
188,70	190,00	189,35	103,4

HV	Error
105,0	4,5

Tabla 5: Resultados dureza Vickers en Aluminio UNS A92017 (Lateral)

**UNS A92017 Central**

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
206,80	196,80	201,80	91,1
201,40	203,00	202,20	90,7
198,30	210,50	204,40	88,8
195,10	203,90	199,50	93,2
202,00	208,10	205,05	88,2
196,20	208,40	202,30	90,6
202,20	202,60	202,40	90,5
207,50	200,30	203,90	89,2
194,60	208,10	201,35	91,5
206,30	196,40	201,35	91,5
199,10	210,20	204,65	88,6
203,70	198,80	201,25	91,6

HV	Error
90,4	2,1

Tabla 6: Resultados dureza Vickers en Aluminio A92017 (Central)

Como se puede observar, las durezas promedio obtenidas y sus errores asociados no se solapan. Este hecho demuestra la no-uniformidad de la dureza a lo largo del ancho de la pieza, provocado por la naturaleza del fresado de la superficie mediante fresa frontal, en la dirección del eje longitudinal de la pieza.

**6.1.2.3. Bronce UNS C62300**

Para el Bronce UNS C62300, se han realizado tomas de dureza en la zona lateral y central de la probeta, obteniendo el siguiente resultado:

**UNS C62300 Lateral**

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
109,30	103,10	106,20	328,8
108,70	106,60	107,65	320,0
111,00	104,10	107,55	320,6
106,70	108,50	107,60	320,3
105,00	106,00	105,50	333,2
108,30	110,00	109,15	311,3
105,90	113,00	109,45	309,6
112,00	104,00	108,00	318,0
106,90	113,50	110,20	305,4
105,60	103,40	104,50	339,6
109,70	109,30	109,50	309,3
107,00	112,40	109,70	308,2

HV	Error
318,7	10,5

Tabla 7: Resultados dureza Vickers en UNS C62300 (Lateral)



UNS C62300 Central

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
102,60	114,90	108,75	313,6
103,10	113,60	108,35	315,9
103,90	118,40	111,15	300,2
108,50	110,10	109,30	310,4
108,30	109,90	109,10	311,6
105,90	112,30	109,10	311,6
106,50	114,60	110,55	303,5
107,20	109,90	108,55	314,8
102,30	114,40	108,35	315,9
102,30	113,40	107,85	318,8
108,20	113,40	110,80	302,1
104,40	114,60	109,50	309,3

HV	Error
310,2	10,9

Tabla 8: Resultados dureza Vickers en Bronce UNS C62300 (Central)

En este caso, se observa como los resultados de dureza se solapan, lo que muestra que al menos la dureza es uniforme en todo el ancho de la probeta.

## 6.2. Método de dureza Brinell

El método de dureza Brinell consiste en determinar la dureza de un material mediante la huella producida por una esfera de material más duro en la superficie del mismo. Entran en juego la fuerza ejercida por esta esfera, su diámetro y el tiempo de compresión, todos ellos normalizados y definidos por la norma UNE-EN ISO 6506-1:2006.

El ensayo se realiza según la norma mencionada, que fija las especificaciones técnicas que debe cumplir la máquina de ensayo, así como los parámetros de operación, como el tiempo de aplicación de la fuerza, la temperatura o el grosor de la pieza a ensayar. (11)

Las similitudes entre este ensayo y el proceso de bruñido, como es la herramienta de punta esférica (o bola), abren un camino de estudio con el objetivo de determinar si existe relación alguna entre el paso lateral y el diámetro de la huella, para así poder generar datos de partida recomendables para futuros procesos de bruñido.



Figura 18: Máquina de ensayo Brinell

Después de obtener las huellas, se procede a medirlas. Para ello se utiliza un microscopio conectado a un ordenador con el software *Motic Images*, que permite medir en píxeles las huellas, para posteriormente convertir este dato en *mm*, con la ayuda de una escala normalizada para calibrar. De cada huella se realiza una medida para cada diámetro perpendicular, cuyo valor medio se toma como *d*. Mediante la siguiente expresión se determina *HB*.

$$HB = \frac{0,102}{\pi * D} * \frac{2 * F}{D - \sqrt{D^2 - d^2}}$$

Ecuación 10: Cálculo dureza HB

### 6.2.1. Condiciones de ensayo mediante durómetro Brinell

Los valores del diámetro de la esfera, la fuerza a aplicar o el tiempo se pueden combinar con la condición de que cumplan con la siguiente relación conocida como *constante de ensayo K* (Anexo E: ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

$$K = \frac{F/g}{D}$$

Ecuación 11: Constante de ensayo K

Esta constante depende del material a ensayar y verifica la relación  $0,24 \leq \frac{d}{D} \leq 0,6$ .

Siguiendo estas directivas, las condiciones de ensayos seguidas son las siguientes:

- Para el Aluminio UNS A92017. (HBW 2,5/62,5)
  - $K = 10$
  - $F = 612,9 \text{ N}$
  - $D = 2,5 \text{ mm}$
- Para el Bronce UNS C62300. (HBW 2,5/187.5)
  - $K = 30$
  - $F = 1837 \text{ N}$
  - $D = 2,5 \text{ mm}$

La dureza del acero se convierte directamente de la dureza HV obtenida en el durómetro Vickers.

## 6.2.2. Resultados

### Acero UNS G10380

Conversión directa de HV a HB

HB	
180,7	±3,23

### Aluminio UNS A92017 Central

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (px)	d (mm)	HB
243,45	249,92	246,69	1,04	69,8
244,37	248,18	246,28	1,04	70,0
244,96	244,37	244,67	1,03	71,0
247,59	243,51	245,55	1,04	70,5
241,17	251,69	246,43	1,04	69,9

HB	
70,4	±0,61

### Aluminio UNS A92017 Lateral

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (px)	d (mm)	HB
249,04	255,76	252,40	1,07	66,5
256,04	253,13	254,59	1,08	65,3
253,13	259,25	256,19	1,08	64,4
249,04	254,13	251,59	1,06	66,9
249,92	261,87	255,90	1,08	64,6

HB	
65,7	±1,26

### Bronce UNS C62300

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (px)	d (mm)	HB
227,18	234,18	230,68	0,98	240,9
225,13	234,17	229,65	0,97	243,2
225,13	229,79	227,46	0,96	248,1
223,67	229,80	226,74	0,96	249,7
225,43	236,51	230,97	0,98	240,3

HB	
245,0	±4,73

Tabla 9: Resultados ensayo de dureza Brinell

Como se puede observar, la dureza del aluminio no es la misma en todo el ancho de la pieza, algo que corrobora la discrepancia observada en el ensayo de dureza Vickers.

## 7. Optimización de los parámetros del proceso de bruñido con bola en diversos materiales.

Se han analizado piezas de tres materiales distintos: acero, aluminio y titanio. Las dimensiones de las probetas no son un factor determinante en este estudio, aunque si deben tener ciertas características que permitan su ensayo de forma conveniente. Son piezas de sección rectangular, con un grosor comprendido entre 15-25mm, que permita su correcta fijación en la máquina de CNC.

### 7.1. Primer ensayo: Optimización de los parámetros del proceso de bruñido con bola en acero UNS G10380.

#### 7.1.1. Características de la probeta.

En el momento del ensayo ya se había trabajado previamente en la pieza, y presentaba un fresado de acabado superficial aceptable para proceder con el bruñido. No obstante, se decidió realizar de nuevo un fresado de desbaste y otro de acabado para mejorarlo.

Para el primer ensayo, la pieza proviene de un semiproducto de acero UNS G10380, cuyas dimensiones y propiedades se describen a continuación.



Figura 19: Probeta de acero UNS G10380

Propiedades físicas	
Densidad	7,845 g/cm <sup>3</sup>
Propiedades mecánicas	
Dureza Brinell	180,7
Dureza Vickers	189,7
Tensión de Rotura	515 MPa
Límite Elástico	285 MPa
Módulo de Young	200 GPa

Tabla 10: Propiedades Acero UNS G10380

### 7.1.2. Fresado previo.

El fresado previo se ha realizado con la fresa frontal de  $\varnothing 80\text{mm}$  y  $z = 3$  cuchillas. La herramienta dispone de anclaje con tornillo para 6 cuchillas, pero debido a la rotura del tornillo que sujetaba a una de ellas, se ha reducido el número de las mismas a la mitad, para conservar el equilibrio y no descompensar la herramienta.

Se realizaron dos pasadas: una de desbaste y otra de acabado. Los parámetros del proceso son los siguientes:

	Desbaste	Acabado
$V_c$	80 m/min	100.53 m/min
$n$	320 rpm	400 rpm
$a_z$	0.08 mm/rev	0.08 mm/rev
$z$	3	3

Tabla 11: Parámetros de fresado previo. Probeta Acero UNS G10380

Los valores del proceso los propuso el profesor en este experimento, aumentando las revoluciones por minuto, de 320 rpm a 400 rpm para obtener un mejor resultado en la pasada de acabado. Teniendo en cuenta las condiciones del experimento, se ajustaron las revoluciones de la herramienta para que la velocidad de corte  $V_c$  no excediera demasiado de 100 m/min, ya que por encima de ese valor no es recomendable para el acero.



Figura 20: Fresado

### 7.1.3. Bruñido.

Los datos de partida para este experimento han sido facilitados por el profesor Ramón Jerez. De su documento, se han extraído los óptimos. Se han añadido dos variables de entrada nuevas: el paso lateral  $b$  y la amplitud de la vibración  $A$ . No obstante, el algoritmo que minimiza la función objetivo puede trabajar con más variables de entrada, con la condición de tener  $x + 1$  puntos de entrada: para 4 variables, existen 5 puntos de entrada.

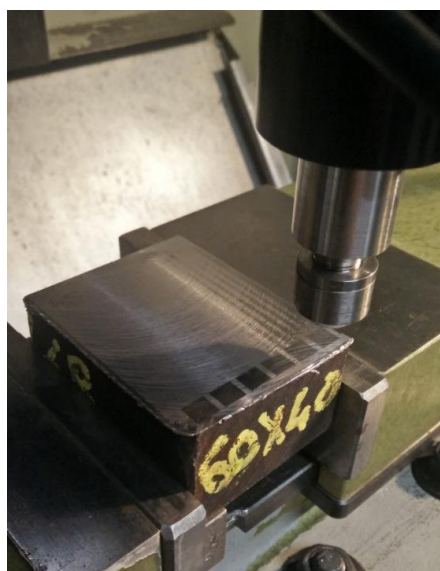


Figura 21: Bruñido Acero UNS G10380

Desde un principio se han llevado a cabo dos ensayos paralelos con datos de partida combinados de diferente forma, con tal de consolidar un resultado. En cierto punto, se observó que el perfil de rugosidad que arrojaba el rugosímetro parecía el perfil de ondulación de la superficie, y se decidió

probar con un *cutoff* diferente (e inadecuado), algo que llevó a resultados no válidos. Como se puede ver en la Tabla 11, para el rango de rugosidades en el que se mueve la superficie de la pieza, el *cutoff* tiene un valor de 0,8. Fue necesario realizar los ensayos de nuevo desde el punto en que cambiamos este parámetro. A partir de este punto, se continuó únicamente con uno de los dos ensayos, por razones de tiempo

#### 7.1.4. Datos de partida.

Se partió de  $Ra = 1,01$ .

Iteración	0	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración
Material UNS G10380 -	1	NS G10380-90-300-0,	90,0	300	0,20	70%
	2	NS G10380-180-300-0	180,0	300	0,25	70%
	3	NS G10380-180-900-0	180,0	900	0,30	70%
	4	NS G10380-270-900-0	270,0	900	0,25	70%
	5	NS G10380-90-300-0,	90,0	300	0,25	50%

Tabla 12: Datos de partida Acero UNS G10380

#### 7.1.5. Resultados.

Iteración	27	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra ( $\mu\text{m}$ )
Material UNS G10380 -	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383
	2	G10380-286,27-1139,3	286,27	1139,4	0,16	70%	0,405
	3	G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417
	4	70,0193750000001-156	70,02	157	0,23	70%	0,428
	5	80-256,72875-1129,01	256,73	1129	0,12	70%	0,440

Tabla 13: Resultados Acero UNS G10380

### 7.1.6. Análisis de los resultados.

Siguiendo el criterio de convergencia establecido, el ensayo realizado en el acero UNS G10380 ha convergido en la iteración nº27.

A medida que iba sucediendo iteración tras iteración, se pudo apreciar la poca influencia que ejercían la velocidad de avance y la amplitud de la vibración en la rugosidad final.

Por un lado, en lo que se refiere a la amplitud de la vibración, se realizaron algunas pruebas no registradas sin vibración y con ella al 100% y los resultados no variaron. Tomaremos igualmente una amplitud óptima de  $A = 70\%$ .

Por otro lado, los resultados muestran como la velocidad de avance no presenta convergencia clara. El motivo de no apreciar una influencia clara de este parámetro puede ser debido a que el coeficiente de endurecimiento cinemático de este material sea demasiado pequeño para el rango de velocidades de avance en el que se ha trabajado. Se tomará como velocidad de avance óptima la que ha resultado en mejor acabado superficial,  $V_a \approx 956 \text{ mm/min}$ .

Los parámetros que tienen una mayor influencia en  $Ra$  han sido la fuerza de bruñido y el paso lateral.

La fuerza óptima se ha establecido en  $F_{\text{óptima}} = 245 \pm 42$ .

La segunda de ellas se sitúa en un rango óptimo más amplio. Previsiblemente, hubieran sido necesarias más iteraciones con tal de obtener valores más convergentes para este parámetro. Aun así, se ha establecido como óptimo  $b_{\text{óptimo}} = 0.195 \pm 0.035$

<b>F (N)</b>	245±42
<b>Va (mm/min)</b>	≈950
<b>b (mm)</b>	0,195±0,035
<b>A (%)</b>	70%

Tabla 14: Parámetros óptimos Acero UNS G10380



## 7.2. Segundo ensayo: Optimización de los parámetros del proceso de bruñido con bola en Aluminio UNS A92017.

### 7.2.1. Características de la probeta.

Para el ensayo con aluminio, se utilizará una probeta de sección rectangular que proviene de un semiproducto de aluminio UNS A92017, cuyas dimensiones y propiedades se describen a continuación.



Figura 22: Probeta de Aluminio UNS A92017.

Dimensiones: 119,1mm x 58,3mm x 20,3mm

Propiedades físicas	
Densidad	2,780 g/cm <sup>3</sup>
Propiedades mecánicas	
Dureza Brinell	125
Dureza Vickers	97,7
Tensión de Rotura	427 MPa
Límite Elástico	275 MPa
Módulo de Young	72,4 GPa

Tabla 15: Propiedades Aluminio UNS A92017

### 7.2.2. Fresado previo

El fresado previo se ha realizado con la fresa frontal de  $\varnothing 60\text{mm}$  y  $z = 3$  cuchillas. Se realizaron dos pasadas: una de desbaste y otra de acabado. Los parámetros del proceso son los siguientes:

	Desbaste	Acabado
$V_a$	250 mm/min	200 mm/min
$n$	4000 rpm	1000 rpm
$z$	3	3

Tabla 16: Parámetros de fresado previo. Probeta Aluminio UNS A92017

### 7.2.3. Bruñido

Los datos de partida para este experimento han sido facilitados por el profesor Ramón Jerez. Cabe destacar que, debido a que el aluminio es más blando, las fuerzas de bruñido iniciales son menores que en el acero. Como con el acero, se han añadido dos variables de entrada nuevas: el paso lateral  $b$  y la amplitud de la vibración  $A$ .



Figura 23: Probeta de Aluminio UNS A92017 bruñida.

### 7.2.4. Datos de partida

Se partió de  $Ra = 2.08$

#### i) Simplex A

Iteración	0	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración
Material UNS A92017 -	1	UNS A92017-90-300-0,5	90,0	300	0,15	50%
	2	UNS A92017-120-600-0,75	120,0	600	0,20	75%
	3	UNS A92017-60-600-0,25	60,0	600	0,25	25%
	4	UNS A92017-90-900-0,75	90,0	900	0,15	75%
	5	UNS A92017-120-300-0,5	120,0	300	0,20	50%

Tabla 17: Datos de partida Simplex A, UNS A92017

#### ii) Simplex B

Iteración	0	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración
Material UNS A92017 -	1	UNS A92017-60-300-0,25	60,0	300	0,15	25%
	2	UNS A92017-90-600-0,5	90,0	600	0,20	50%
	3	UNS A92017-120-900-0,75	120,0	900	0,25	75%
	4	UNS A92017-60-900-0,75	60,0	900	0,25	75%
	5	UNS A92017-120-300-0,5	120,0	300	0,15	50%

Tabla 18: Datos de partida Simplex B, UNS A92017

### 7.2.5. Resultados

#### i) Simplex A

Iteración	14	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)
Material	1	UNS A92017-60-900-0,3	60,0	900	0,18	30%	0,839
UNS A92017	2	A92017-75,5859375-1301,9531	75,6	1302	0,18	20%	0,850
-	3	A92017-93,515625-1511,7187	93,5	1512	0,14	60%	0,855
	4	UNS A92017-60-600-0,25	60,0	600	0,25	25%	0,857
	5	A92017-75,439453125-1163,9648	75,4	1164	0,18	20%	0,895

Tabla 19: Resultados Simplex A, UNS A92017

#### ii) Simplex B

Iteración	14	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)
Material	1	A92017-64,6875-431,25-0,4082	64,7	431,25	0,17	41%	0,778
UNS A92017	2	A92017-53,73046875-62,109375-0,238	53,7	62,11	0,10	24%	0,781
-	3	A92017-58,59375-309,375-0,3365	58,6	309,38	0,15	34%	0,782
	4	UNS A92017-60-300-0,25	60,0	300,00	0,15	25%	0,788
	5	A92017-53,53515625-205,95703125-0,2	56,2	205,96	0,13	29%	0,794

Tabla 20: Resultados Simplex B, UNS A92017

### 7.2.6. Análisis de resultados

Siguiendo el criterio de convergencia establecido, el ensayo realizado en el aluminio UNS A92017 ha convergido en la iteración nº14 en ambos ensayos. Los resultados de  $Ra$  de ambos ensayos no convergen en el mismo rango. Por lo tanto, se toman como valores óptimos los obtenidos en el Simplex B, debido a los valores de rugosidad obtenidos.

Esta falta de convergencia entre los dos ensayos puede ser debida al propio algoritmo y su funcionamiento, que puede haber localizado dos mínimos locales distintos de la función que representa  $Ra$ .

Centrándonos en el ensayo B, se aprecia que, como con el acero, la amplitud de la vibración y la velocidad de avance no presentan una convergencia clara y, de nuevo, no son parámetros con influencia destacable en la  $Ra$  resultante, de la misma forma que no lo eran para el acero. El

motivo puede ser el mismo: un coeficiente de endurecimiento cinemático del material demasiado pequeño para el rango de velocidades de avance en el que se ha trabajado.

Se considerará velocidad de avance óptima  $Va = 431,25 \text{ mm/min}$ , que es el valor que mejor  $Ra$  ha conseguido.

Por su parte, para la amplitud de vibración, se considerará un valor óptimo de  $A = 30\%$  siguiendo la misma lógica que para  $Va$ .

Para la fuerza de bruñido óptima, se ha establecido en  $F_{\text{óptima}} = 59 \pm 6$ . Cabe destacar que, según los resultados de estos dos ensayos, una menor fuerza resulta en un mejor acabado superficial.

En lo que al paso lateral óptimo se refiere, se ha establecido en  $b_{\text{óptimo}} = 0.14 \pm 0.04$

<b>F (N)</b>	59±6
<b>Va (mm/min)</b>	≈431,25
<b>b (mm)</b>	0,14±0,04
<b>A (%)</b>	30%

Tabla 21: Parámetros óptimos Aluminio UNS A92017

### 7.3. Tercer ensayo: Optimización del proceso de bruñido con bola en Bronce UNS C62300.

#### 7.3.1. Características de la probeta

Como en los ensayos anteriores se utilizará una probeta de sección rectangular que proviene de un semiproducto de bronce aluminio UNS C62300, cuyas dimensiones y propiedades se describen a continuación.

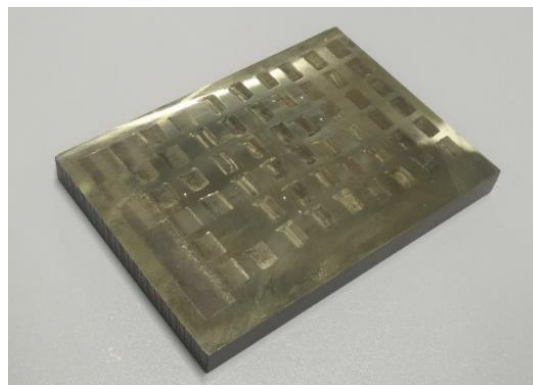


Figura 24: Probeta de Bronce UNS C62300

Dimensiones: 110,5mm x 72mm x 16mm

Propiedades físicas	
Densidad	7,650 g/cm <sup>3</sup>
Propiedades mecánicas	
Dureza Brinell	245,0
Dureza Vickers	314,5
Tensión de Rotura	550 MPa
Límite Elástico	200 MPa
Módulo de Young	113 GPa

Tabla 22: Propiedades Bronce Aluminio C62300

### 7.3.2. Fresado previo

El fresado previo al bruñido de este material se realizó con los siguientes parámetros de proceso:

	Acabado
<b>V<sub>a</sub></b>	220 mm/min
<b>n</b>	1.200 rpm
<b>p</b>	0,2 mm/rev

Tabla 23: Parámetros fresado Bronce UNS C62300

### 7.3.3. Bruñido

Los datos de partida para este experimento no se conocían en el momento de empezar el bruñido. Por lo tanto, mediante los parámetros óptimos de proceso obtenidos en los materiales anteriores y sus propiedades mecánicas, se obtuvieron los parámetros para el UNS C62300.

El método utilizado para la obtención de estos valores consiste en relacionar cada parámetro con cada propiedad del material. Esto genera un gráfico que contiene las propiedades de los materiales en el eje X, y los parámetros de operación en el eje Y. De esta manera, se obtienen dos puntos, los cuales generan una función mediante la cual, interpolando con las propiedades del UNS C62300, obtenemos una propuesta de parámetros de operación que utilizaremos como punto de partida.

A continuación se expone un ejemplo del método utilizado.

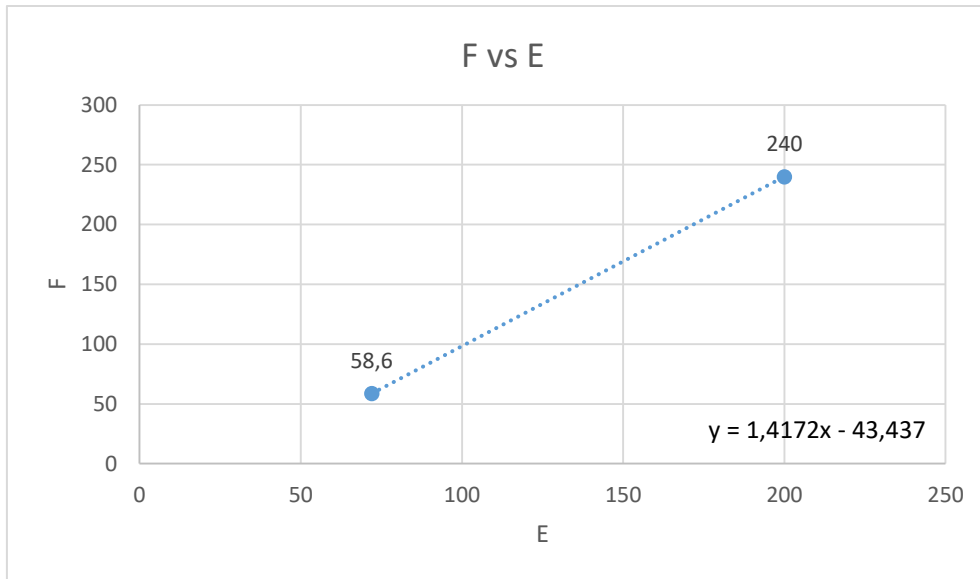


Gráfico 4: Fuerza - Módulo de Young. Estimación parámetros de bruñido para Bronce UNS C62300

Los puntos de partida son los siguientes:

- Para el acero UNS G10380, (200, 240).
- Para el aluminio UNS A92017, (72.4, 58.6).

La ecuación que representa la recta de regresión es:

$$y = 1,4172x - 43,437$$

Ecuación 12: Recta de regresión

Se realiza una sustitución con el valor del Módulo de Young del Bronce UNS C62300, obtenemos el valor de la fuerza a aplicar. Este procedimiento se realiza para la fuerza y el paso lateral (Anexo D, relacionándolos con:

- Módulo de Young,  $E$ .
- Límite elástico,  $Rp_{0,2\%}$ .
- Tensión máxima,  $\sigma_{max}$ .
- Dureza Brinell,  $HB$ .

Esto genera un rango de fuerzas y pasos laterales a utilizar como datos de partida en el bruñido, con un valor central, un máximo y un mínimo.

Este ejercicio se realiza únicamente para la fuerza y el paso lateral teniendo en cuenta la influencia que han tenido en las rugosidades obtenidas en los dos materiales anteriores. El conjunto estimado de datos de partida se encuentran en el apartado 7.3.4.

### 7.3.4. Datos de partida

Se partió de  $Ra = 1.37$

i) Simplex A

Iteración	0	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración
Material UNS C62300 -	1	NS C62300-96-900-0,7	96,0	900	0,16	75%
	2	Br9Al-232,8-600-0,5	232,8	600	0,19	50%
	3	NS C62300-374-300-0,1	374,0	300	0,15	25%
	4	NS C62300-116-600-0,1	116,0	600	0,20	50%
	5	NS C62300-345-900-0,1	345,0	900	0,23	75%

Tabla 24: Datos de partida Simplex A, Bronce UNS C62300

ii) Simplex B

Iteración	0	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración
Material UNS C62300 -	1	UNS C62300-96-600-0,75	96,0	600,00	0,23	75%
	2	UNS C62300-374-900-0,25	374,0	900,00	0,16	25%
	3	UNS C62300-232,8-300-0,75	232,8	300,00	0,19	75%
	4	UNS C62300-345-300-0,5	345,0	300,00	0,15	50%
	5	UNS C62300-116-600-0,5	116,0	600,00	0,20	50%

Tabla 25: Datos de partida Simplex B, Bronce UNS C62300



### 7.3.5. Resultados

#### i) Simplex A

Iteración	16	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (μm)
Material	1	C62300-245,984375-27	246,0	275	0,14	50%	0,422
UNS C62300	2	307,283447265625-18	307,3	186	0,13	30%	0,437
-	3	311,518798828125-20	311,5	210	0,12	30%	0,442
	4	300-247,638671875-15	247,6	159	0,13	50%	0,458
	5	2300-359,3935546875	359,4	400	0,07	40%	0,468

Tabla 26: Resultados Simplex A, UNS C62300

#### ii) Simplex B

Iteración	16	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (μm)
Material	1	0-414,7653125-589,101406	414,8	589,10	0,14	48%	0,446
UNS C62300	2	2300-416,35375-568,801875	416,4	568,80	0,13	44%	0,458
-	3	NS C62300-410-710,16-0,2	410,0	710,16	0,16	27%	0,466
	4	C62300-424,8075-519,1454	424,8	519,15	0,14	47%	0,514
	5	S C62300-410-758,29875-0,	410,0	758,30	0,14	75%	0,549

Tabla 27: Resultados Simplex B, UNS C62300

### 7.3.6. Análisis de los resultados

Siguiendo el criterio de convergencia establecido, el ensayo realizado en el bronce UNS C62300 ha convergido en la iteración nº16 en ambos ensayos. A partir de estos dos resultados, se decide realizar un tercer Simplex con los mejores resultados de los dos anteriores. El objetivo es, además de tratar de conseguir mejores resultados, obtener un conjunto de valores para la fuerza y el paso lateral más definido.

Se realizaron 8 iteraciones, observando como la fuerza se situaba en valores entre 200N y 300N, y el paso lateral se situaba entre 0,13mm y 0,14mm. No obstante, se registró un bruñido en la zona central de la pieza con una rugosidad superficial inusualmente baja (0,180μm). Después de realizar la comprobación de la misma en la zona lateral, se obtuvo un resultado totalmente distinto (0,587μm).

Esto nos indica que las características de la superficie tras el fresado no son uniformes, y a raíz de este hecho, se decidió detener el ensayo, y tomar los resultados de fuerza y paso lateral del Simplex A como óptimos. La razón de esta decisión es la tendencia de este SIMPLEX C a converger a fuerzas cercanas a las obtenidas en el SIMPLEX A.

Iteración	0	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)
Material UNS C62300 -	1	300-245,98437	246,0	275,00	0,14	50%	0,422
	2	28344726562	307,3	186,33	0,13	30%	0,437
	3	51879882812	311,5	209,96	0,12	30%	0,442
	4	653125-589,1	414,8	589,10	0,14	48%	0,446
	5	16,35375-568	416,4	568,80	0,13	44%	0,458

Tabla 28: Datos de partida Simplex C, UNS C62300

Iteración	8	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)
Material UNS C62300 -	1	5100097656-3	271,7	340	0,13	20%	0,180
	2	223,42221675	223,4	365	0,13	30%	0,328
	3	376,13802886	376,1	375	0,13	10%	0,356
	4	770751953-3	212,7	373	0,14	40%	0,383
	5	300-245,98437	246,0	275	0,14	50%	0,422

Tabla 29: Resultados Simplex C, UNS C62300

<b>F (N)</b>	300±55
<b>Va (mm/min)</b>	450±200
<b>b (mm)</b>	0,13±0,01
<b>A (%)</b>	40%

Tabla 30: Resultados óptimos para Bronce UNS C62300

## **7.4. Verificación de variación de la amplitud**

Como se ha mencionado en los análisis anteriores, no se ha apreciado influencia alguna de la vibración en los resultados de los ensayos, fuese cual fuese la posición del potenciómetro que modifica la amplitud. Posteriormente se ha comprobado el sistema, y se ha llegado a la conclusión de que no está bien ajustado, y la herramienta no es capaz de transmitir las variaciones de amplitud de manera apropiada.

## 8. Relación de resultados y propiedades del material

Uno de los objetivos del presente trabajo es analizar la relación entre los parámetros óptimos de bruñido obtenidos, y las propiedades del material más relevantes (descritas en *Conceptos previos*), con tal de elaborar una propuesta de parámetros de proceso para futuros bruñidos en otros metales.

Como se menciona en los apartados anteriores, los parámetros de proceso más relevantes son la fuerza y el paso lateral.

A destacar la utilización de un modelo lineal para ajustar los tres puntos (tres materiales) que se han estudiado y cuantificar cuan relacionados están con las propiedades del material. No se ajustan los puntos mediante función polinómica porque está pasando por todos ellos y carecería de sentido el ejercicio.

### 8.1. Fuerza

Considerando, para cada material, el valor óptimo del parámetro, en formato de valor medio con máximo y mínimo, se obtienen los siguientes gráficos.

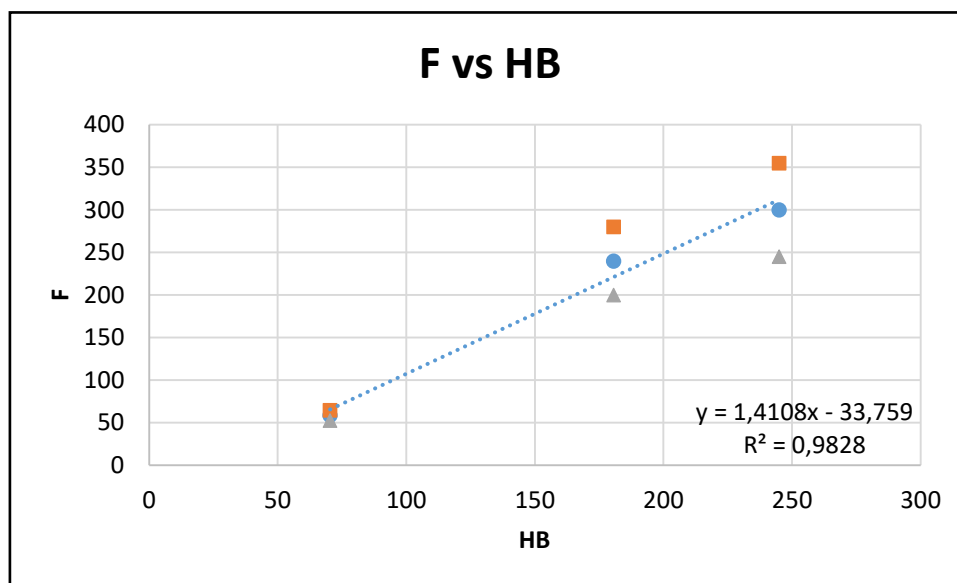


Gráfico 5: Fuerza – Dureza Brinell

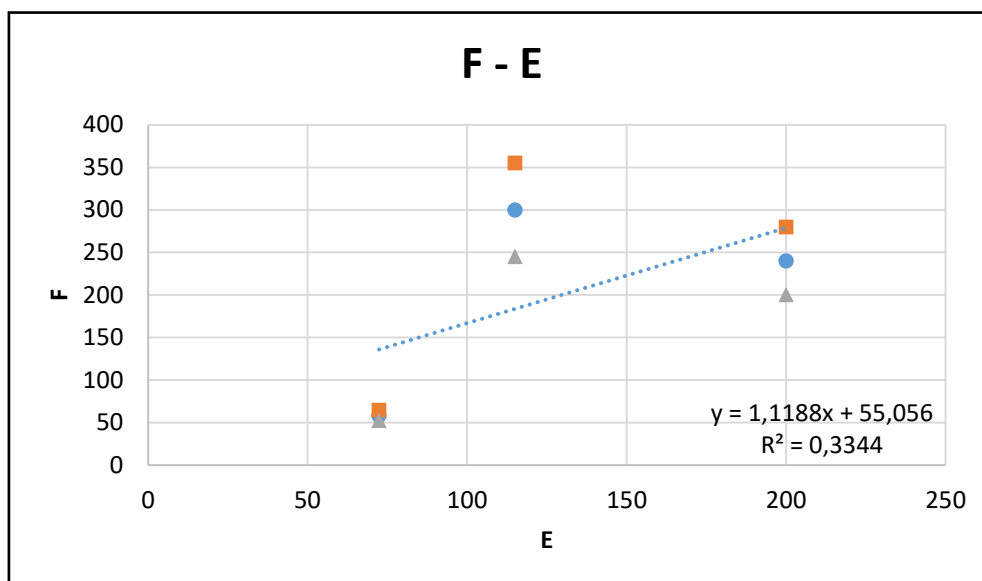


Gráfico 6: Fuerza - Módulo de Young

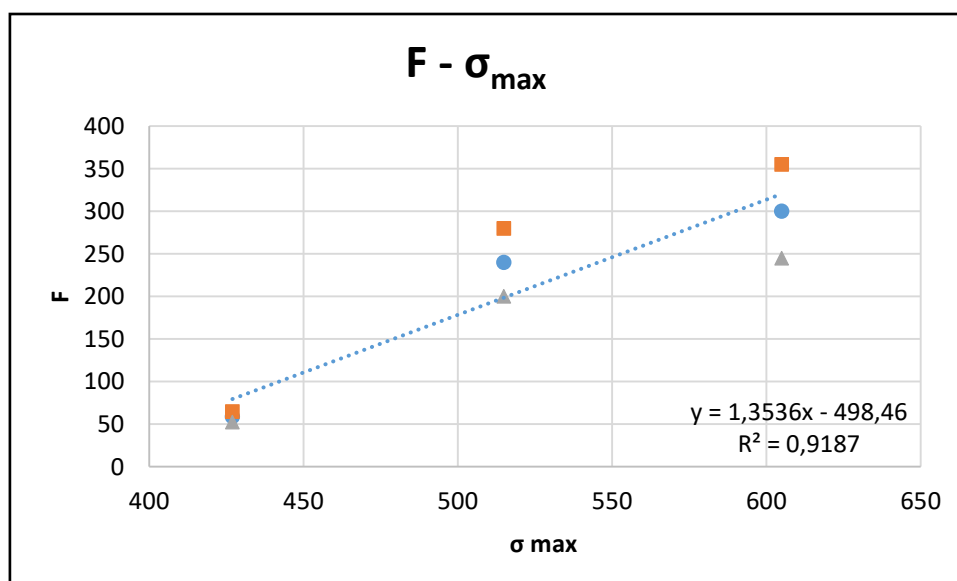


Gráfico 7: Fuerza – Tensión máxima a rotura

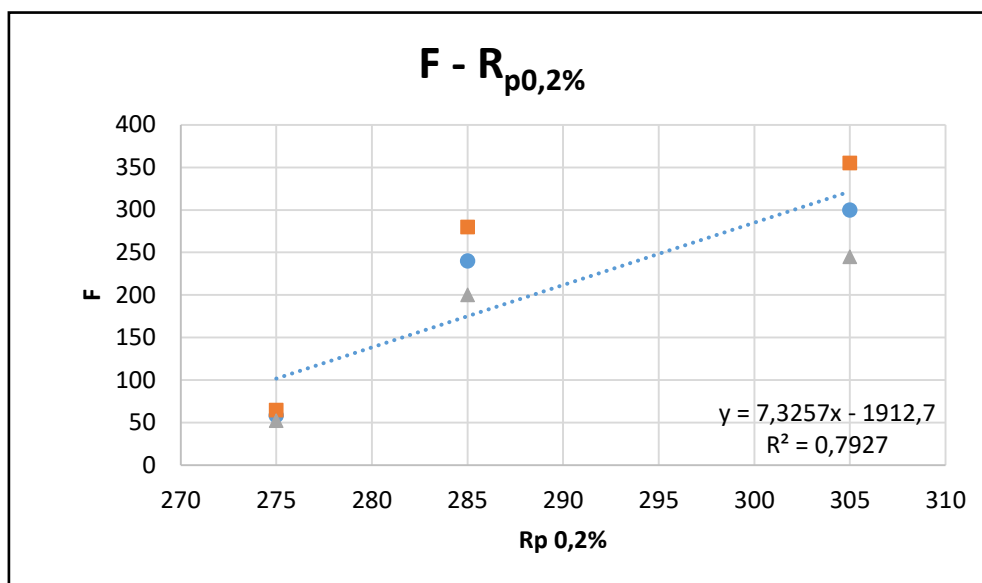


Gráfico 8: Fuerza – Límite elástico

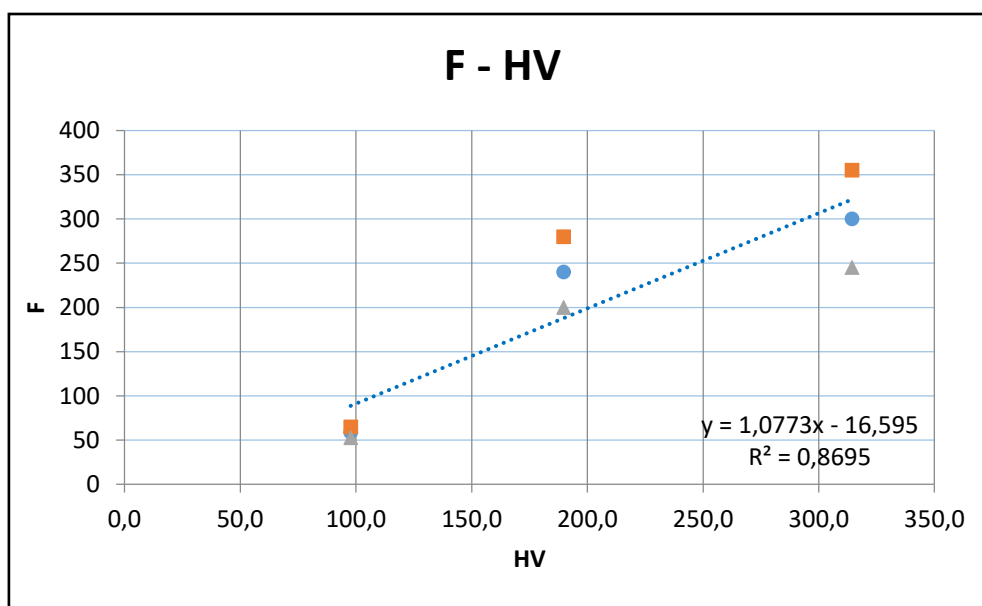


Gráfico 9: Fuerza – Dureza Vickers

### 8.1.1. Análisis de resultados

En el caso de la fuerza, la relación entre ésta y la dureza Brinell es la que presenta un índice de correlación mayor  $R^2 = 0.9828$ , y por lo tanto, una mayor dependencia entre las variables. De esta forma, se tomará HB como la primera opción para generar valores de fuerza óptimos para bruñir diferentes metales.

## 8.2. Paso lateral

De la misma manera que para la fuerza, los gráficos obtenidos para el paso lateral son los siguientes:

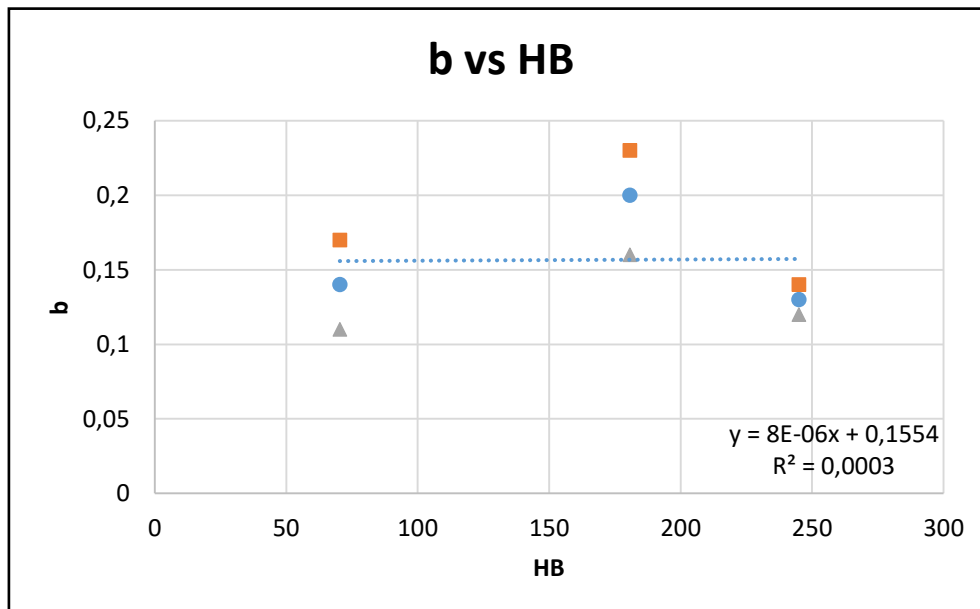


Gráfico 10: Paso lateral – Dureza Brinell

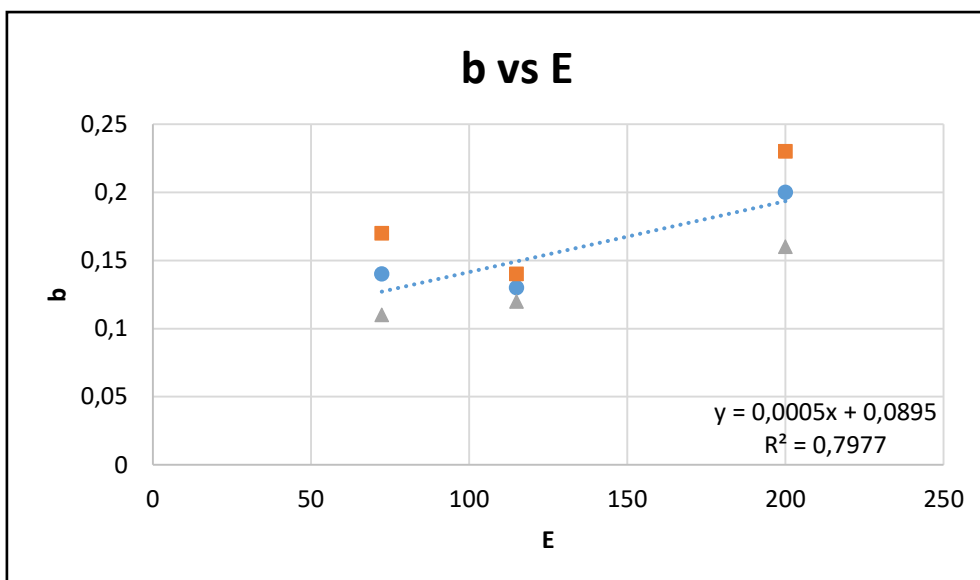


Gráfico 11: Paso lateral – Módulo de Young

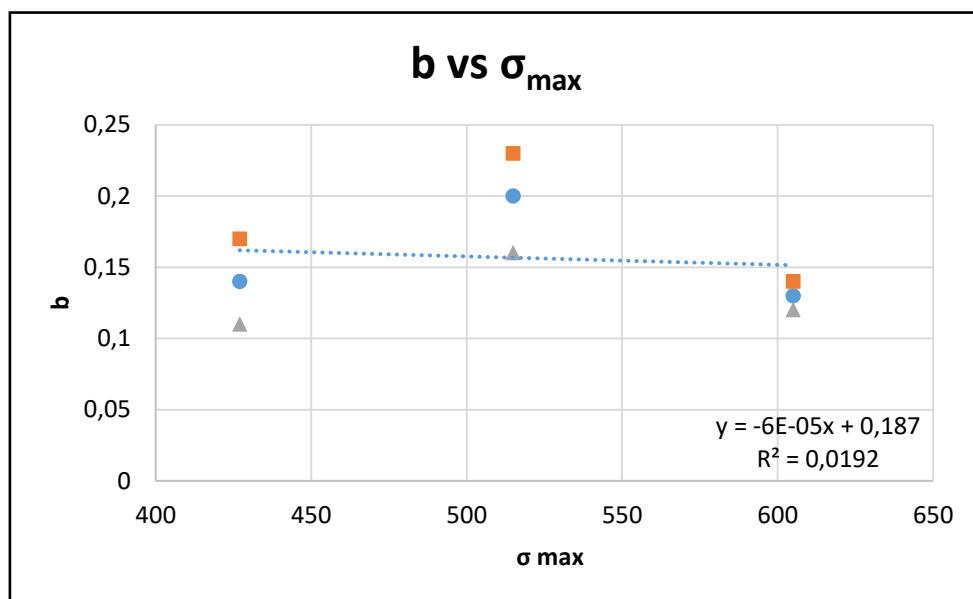


Gráfico 12: Paso lateral - Tensión máxima a rotura

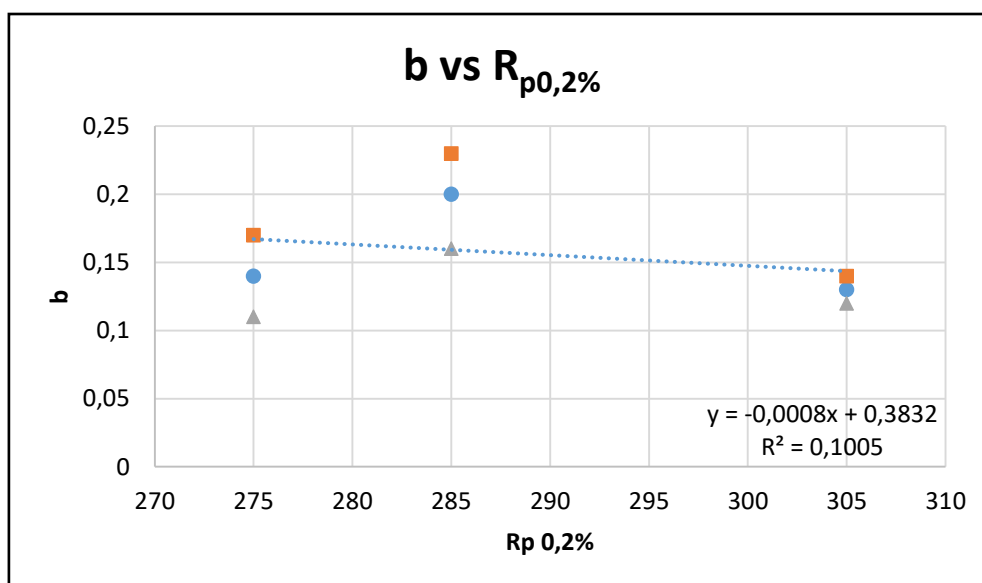


Gráfico 13: Paso lateral - Límite de elasticidad



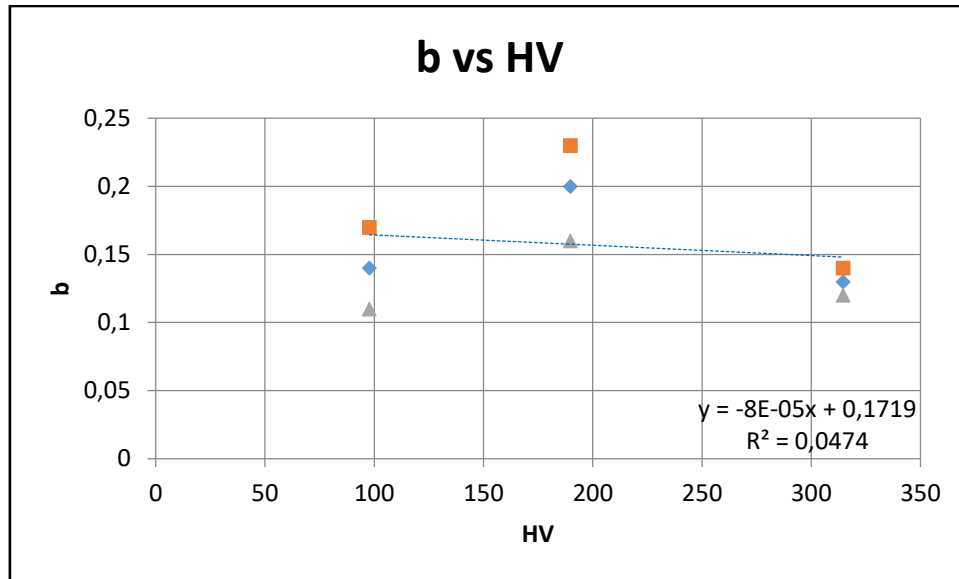


Gráfico 14: Paso lateral - Dureza Vickers

### 8.2.1. Análisis de los resultados

Para el paso lateral, los resultados no presentan un coeficiente de correlación cercano a lo ideal. La relación del paso lateral con el Modulo de Young es la que mejor coeficiente de correlación presenta  $R^2 = 0.7977$ . Por lo tanto, la fiabilidad de los valores de paso lateral para otros materiales sería menor que en el caso de la fuerza. No obstante, y careciendo de otra opción mejor, se tomará el Módulo de Young como la primera vía para generar valores de paso lateral para bruñir otros metales.

## 8.3. Dureza Brinell y paso lateral

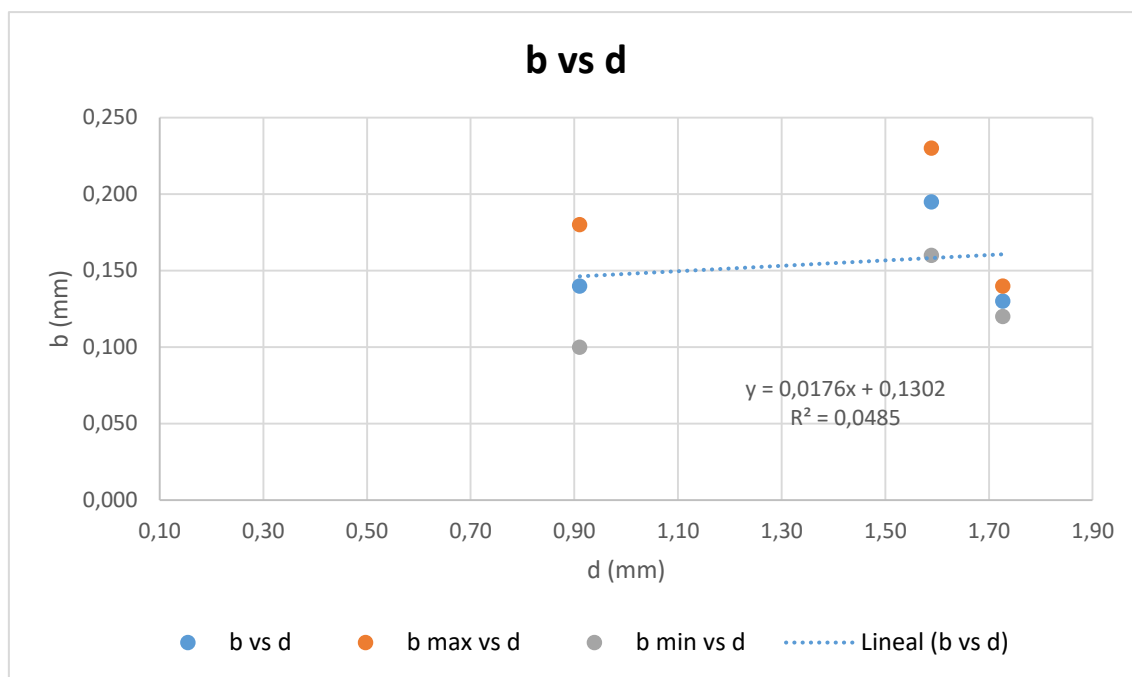
El objetivo del análisis de dureza Brinell es tratar de encontrar una relación entre el diámetro de la huella y el paso lateral en un proceso de bruñido, además de obtener datos de dureza reales. A partir de la expresión mediante la cual es posible calcular la dureza Brinell, se deduce una expresión que relaciona la dureza del material con el diámetro de la huella. Esta fórmula permite calcular el diámetro de la huella con el objetivo de relacionarlo con el paso lateral en un proceso de bruñido, bajo unas condiciones de ensayo análogas.

$$d = D * \left( 1 - \left( 1 - \frac{F}{k * HB * D^2} \right)^2 \right)$$

Ecuación 13: Diámetro huella en función de HB

Siendo  $k = \frac{\pi}{2 * 0.102}$

Mediante la fuerza óptima de bruñido obtenida para cada material, su dureza y el diámetro de la bola de la herramienta de bruñido, se obtiene un diámetro de huella.



Gráfica 1: Relación entre el paso lateral óptimo y el ancho de huella en función de F, D y HB

Como la leyenda indica, en el gráfico se refleja el paso lateral a modo de barra de error, con su valor central, el máximo y el mínimo.

Se ajustan los valores centrales a una recta de regresión y se observa como esta no cruza con los valores óptimos de paso lateral, ni siquiera considerando el intervalo de cada paso lateral. Además el valor de  $R^2$  dista mucho de ser el adecuado.

No existe relación de proporcionalidad entre los parámetros analizados, y por lo tanto, no es posible generar una propuesta de parámetros para bruñir a partir de la dureza del material siguiendo este método.

## 9. Análisis del impacto ambiental

La mejora en la rugosidad superficial que aporta un proceso de bruñido como el del presente trabajo, puede contribuir a mejorar el funcionamiento de la pieza según sea su aplicación.

Sin entrar en excesivo detalle, mejorar la rugosidad superficial de una superficie mecanizada en contacto con otras, causa una disminución del coeficiente de fricción, tanto estático como dinámico. Este hecho, puede aumentar el rendimiento del conjunto, disminuyendo las pérdidas por rozamiento, y en consecuencia, ahorro de energía en el caso de una máquina con algún tipo de motor, ya sea térmico, eléctrico, neumático o hidráulico.

Por otro lado, el impacto ambiental que produce la ejecución de los ensayos consiste en la energía consumida por los equipos utilizados, así como la gestión de residuos generados, que en este caso se considera la gestión de la viruta generada por el proceso de fresado y los lodos de viruta metálica. La taladrina es reutilizada previo filtrado (se sustituye cada año aproximadamente), por lo tanto, no se considerará como residuo.

El proceso de bruñido no genera ningún tipo de residuo, al ser un proceso de mecanizado por deformación plástica y no por arranque de viruta.

### 9.1. Consumo de energía

A continuación se adjunta una tabla que refleja el consumo energético de la realización de este trabajo, así como la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida derivada.

	Horas	Potencia	Consumo total	€/kWh	Impacto ambiental
Máquina CNC	30,50 h	11,00 kW	335,49 kW	0,15	129,16 kg CO <sub>2</sub>
Generador de funcio	2,12 h	0,20 kW	0,42 kW	0,15	0,16 kg CO <sub>2</sub>
Ordenador portátil	728,04 h	0,08 kW	54,60 kW	0,15	21,02 kg CO <sub>2</sub>
Rugosímetro	8,25 h	0,05 kW	0,41 kW	0,15	0,16 kg CO <sub>2</sub>
Iluminación taller	30,50 h	0,18 kW	5,49 kW	0,15	2,11 kg CO <sub>2</sub>
Iluminación oficina	690,00 h	0,18 kW	124,20 kW	0,15	47,82 kg CO <sub>2</sub>
Durómetro Vickers	7,54 h	0,20 kW	1,51 kW	0,15	0,58 kg CO <sub>2</sub>
Durómetro Brinell	0,64 h	0,20 kW	0,13 kW	0,15	0,05 kg CO <sub>2</sub>
Microscopio	1,00 h	0,20 kW	0,20 kW	0,15	0,08 kg CO <sub>2</sub>

201,15 kg CO<sub>2</sub>

Tabla 31: Consumo energético

## 9.2. Gestión de residuos

Existe una legislación vigente en materia ambiental que regula la gestión de residuos a nivel general. La Ley 26/2007, de Responsabilidad Medioambiental, transpone al Derecho español la Directiva 2004/35/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre Responsabilidad Medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales. Esta Ley pretende que las empresas respondan de los daños que causen a determinados recursos naturales, obligándolas a devolver el recurso dañado a su situación inicial o, en caso de no ser posible, a compensar el daño. (12)

Se desglosarán los residuos producidos en la realización de este trabajo como la viruta y lodos metálicos, y el fluido de corte empleado.

Las virutas se generan como material excedente en los procesos de mecanizado por arranque de viruta que utilizan herramientas de geometría definida (brocas, fresas, herramientas de torno, etc.). Estas van impregnadas de fluido de corte.

Los lodos también son generados en procesos de mecanizado, pero esta vez, mediante herramientas de geometría no definida (muelas de rectificado, por ejemplo). Se componen de una mezcla de partículas metálicas de pequeñas dimensiones, fluido de corte y material abrasivo.

Los residuos de fluido de corte, pueden ser clasificados como residuos de fluido de tipo acuoso (taladrinas) y de aceite de corte. Los fluidos de corte se transforman en residuos cuando su naturaleza física y química se degrada de tal manera que no pueden cumplir aquellas funciones básicas para las que fueron destinados: lubricar, refrigerar y limpiar el área de mecanizado. Una de las vías más directas de contaminación al medio son las fugas, salpicaduras y derrames. (13)

Por lo tanto, una vez correctamente recogidos, se pondrán a disposición de entidades especializadas y acreditadas para su correcta gestión y tratamiento. (14)

En el taller de la facultad, existen contenedores diferenciados para recoger los residuos de procesos de mecanizados según el material. En ellos se deposita la viruta tal cual se recoge de la máquina, acompañada de fluido de corte.

## 10. Conclusiones

De la realización de este trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Mediante el bruñido con bola es posible mejorar el acabado superficial de piezas de diferentes materiales previamente mecanizadas.
- Existen diferencias en las propiedades de la superficie del material posteriormente al fresado frontal.
- En este trabajo, la introducción de ultrasonidos para mejorar la rugosidad superficial no ha tenido los resultados esperados, ya que no ha habido diferencia apreciable variando la amplitud de la vibración, debido a un incorrecto funcionamiento del sistema generador-herramienta.
- La utilización del algoritmo SIMPLEX para optimizar los parámetros ha resultado satisfactoria, vista su robustez y a pesar de su lenta convergencia.
- En el caso del acero UNS G10380, la rugosidad ha mejorado de forma significativa, en un 60% aproximadamente respecto a la rugosidad inicial. Para el aluminio UNS A92017, de alrededor un 60%. Y para el bronce UNS C62300 encontramos una mejora de un 70%. En los tres casos, se observa como el proceso de bruñido con bola aporta mejoras considerables en el acabado superficial de la pieza.
- En los tres materiales ensayados, se observa que los parámetros más influyentes en los valores de rugosidad superficial son la fuerza y el paso lateral. Es posible establecer un rango de fuerzas y pasos laterales como valores óptimos. Al final de cada ensayo, la velocidad de avance y la vibración presentan valores muy dispares para rugosidades resultantes similares, sin presentar convergencia, y por lo tanto, sin poder determinar un rango de valores óptimo.
- A partir del ejercicio de relacionar los valores óptimos con las propiedades de los distintos materiales ensayados, es posible generar una propuesta de valores recomendables de fuerza para bruñir distintos materiales. El primer parámetro a tomar como referencia es la dureza Brinell, con el índice de correlación más elevado.
- En el caso del paso lateral, los resultados obtenidos no son los ideales y cualquier propuesta de valores carecería de una fiabilidad significativa. No obstante, el primer parámetro a considerar es el Módulo de Young, con el mejor índice de correlación.
- Por otro lado, en base a los resultados obtenidos en los ensayos de dureza Brinell, no es posible generar una propuesta de paso lateral para futuros bruñidos. Los coeficientes de correlación son muy bajos.

Para futuros trabajos, y siguiendo lo desarrollado en este trabajo:

- Se recomienda realizar un fresado paralelo con fresa semiesférica que asegure una superficie uniforme, en lugar de un fresado frontal como el realizado en este trabajo.

---

## 11. Análisis económico

A continuación se muestra el listado de costes de la realización de este trabajo, cuya justificación se puede encontrar en el Anexo D.

Las premisas tomadas para ello son las siguientes:

- No se incluyen impuestos ni beneficios de la empresa, es únicamente un listado de costes.
- Coste de material, basado en índices de mercado de cada metal ensayado.
- Coste de máquina CNC, basado en el coste real de utilización de una máquina CNC en el sector de la automoción.
- Coste de máquina para ambos durómetros, estimación realizada en base al precio de adquisición de la máquina, amortizando a 10 años, a razón de 180 horas de uso anual.
- Coste de herramienta de mecanizado, basado en la información proporcionada por Sandvik-Coromant en su página web, considerando el coste total de las cuchillas.
- Tiempos calculados en base a los parámetros de mecanizado para cada material, y el tiempo empleado en la realización de cada ensayo completo, incluyendo el tiempo improductivo para cada ensayo y de reajuste de la herramienta.
- Coste energético del equipamiento del taller, incluido en el coste de máquina.
- Calculada mano de obra en base a un sueldo bruto de 45.000€ para un ingeniero, y 30.000€ para un operario. Se tiene en cuenta los conceptos de Contingencias comunes, AT y EP, Desempleo, FP y Fondo de Garantía Salarial.
- Coste de realización de la planificación, tratamiento de datos y memoria calculado con el coste de mano de obra un ingeniero.
- Costes generales de la oficina donde se realiza la planificación, tratamiento de datos y memoria, calculados teniendo en cuenta el gasto en agua, energía eléctrica y alquiler durante los 4 meses de duración del trabajo.

Con todo ello, el coste total del trabajo son **27.500,58€**. El detalle del mismo se encuentra en el Anexo D.

## 12. Bibliografía

1. **Fang-Jung, Shiou & Chien-Hua, Chien.** Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol.26, Iss.12, pp.1492-1502. 2011.
2. **Universidad de Cantabria.** Especificación geométrica de productos. Indicación de la calidad superficial en la documentación técnica de productos. (<http://ocw.unican.es/>).
3. **Universidad Nacional Mar de Plata.** Grupo de Tecnología Mecánica - Procesos de Fabricación. [Online] [Cited: 19 09 2017.] <http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf>.
4. **Henríquez, Lisandro Vargas.** *Desarrollo de un modelo predictivo para la calidad superficial en un proceso de torneado sobre aceros de alta resistencia*. 2014. 12.1.
5. **Calvo, Felipe.** *Metalografía práctica*. s.l. : Alhambra, 1972.
6. **Universidad Jaume I. Dpto. Ingeniería Mecánica y Construcción.** Mecapedia. *Conceptos*. [Online] [Cited: 22 09 2017.] <http://www.mecapedia.uji.es/indices.htm#Conceptos>.
7. **Gómez Gras, G.** *Estudio del proceso de bruñido asistido por una vibración*. Barcelona : s.n., 2015.
8. **Travieso, J.A.** *Estudio para la mejora del acabado superficial de superficies complejas, aplicando un proceso de deformación plástica (Bruñido con Bola)*. Barcelona : s.n., 2010.
9. *Influence of ball burnishing on the fatigue behavior of AISI 1038 specimens*. **R. Jerez-Mesa, G. Gomez-Gras, J.A. Travieso-Rodriguez, M. Madueno-Guerrero, O. Casadesús-Farras, Lluma-Fuentes, J.c.**
10. **Cambridge University Press.** *Simplex. A Numerical Recipe*. 3rd Edition. 2007.
11. **Departamento de Materiales. EUETIB UPC.** Guió de Pràctiques. *CIÈNCIA I TECNOLOGIA DE MATERIALS*. [Online] [ftp://ftp-urgell.upc.es/materials/Assignatures/CTM/CTM\\_Grau\\_Guio-laboratori\\_2010-2011-Q2.pdf](ftp://ftp-urgell.upc.es/materials/Assignatures/CTM/CTM_Grau_Guio-laboratori_2010-2011-Q2.pdf).
12. **ULHI, Instituto de Formación Profesional a Distancia.** Normativa ambiental. *Prevención de riesgos, seguridad y protección ambiental*. [Online] [Cited: 16 10 2017.] [http://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/TFM/TFM01/es\\_DFM\\_TFM01\\_Contenidos/website\\_32\\_normativa\\_ambiental.html](http://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/TFM/TFM01/es_DFM_TFM01_Contenidos/website_32_normativa_ambiental.html).
13. —. Problemáticas ambientales del mecanizado. *Prevención de riesgos, seguridad y protección ambiental*. [Online] [Cited: 16 10 2017.]

---

[http://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/TFM/TFM01/es\\_DFM\\_TFM01\\_Contenidos/website\\_31\\_problemticas\\_ambientales\\_del\\_mecanizado.html](http://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/TFM/TFM01/es_DFM_TFM01_Contenidos/website_31_problemticas_ambientales_del_mecanizado.html).

14. —. Identificación, recogida y gestión de residuos. *Prevención de riesgos, seguridad y protección ambiental*. [Online] [Cited: 16 10 2017.] [http://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/TFM/TFM01/es\\_DFM\\_TFM01\\_Contenidos/website\\_33\\_identificacin\\_recogida\\_y\\_seleccin\\_de\\_residuos.html](http://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/TFM/TFM01/es_DFM_TFM01_Contenidos/website_33_identificacin_recogida_y_seleccin_de_residuos.html).

15. **Askeland, D.R.** *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. s.l. : Thomson-Paraninfo, 2001.

16. **Jorba, Jordi Llumá y Jordi.** FTP Ciències y Enginyeria de Materials (UPC). *Annex 1. Equivaències entre escales de duresa*. [Online] [ftp://ftp-urgell.upc.es/materials/Assignatures/CEMM/Transparencies/CEMM\\_A1.pdf](ftp://ftp-urgell.upc.es/materials/Assignatures/CEMM/Transparencies/CEMM_A1.pdf).

17. Matweb. *Material Property Data*. [Online] <http://www.matweb.com/>.

18. **Universidad del País Vasco. Departamento de Ingeniería Mecánica.** *Metrológia del acabado superficial*. Bilbao : s.n.

19. **Engineer's Handbook.** Hardness Conversion Table. [Online] <http://www.engineershandbook.com/Tables/hardness.htm>.

20. **Zollern Foundry Technology.** Copper Casting Alloys. [Online] [https://www.zollern.com/fileadmin/Upload\\_Konzernseite/Downloads/Brochueren/Casting\\_and\\_Forging/Copper-Casting-Alloys.pdf](https://www.zollern.com/fileadmin/Upload_Konzernseite/Downloads/Brochueren/Casting_and_Forging/Copper-Casting-Alloys.pdf).





TRABAJO FIN DE GRADO

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PROCESO DE BRUÑIDO  
CON BOLA EN DIVERSOS MATERIALES**



**Anexos**

**Autor:** Ivan González Alonso  
**Director:** Jordi Llumà i Fuentes  
**Convocatoria:** Enero 2018

# Índice

A.	Hoja de ruta tecnológica .....	63
B.	Código CNC.....	64
C.	Resultados SIMPLEX .....	65
D.	Gráficos de estimación de parámetros para el bronce UNS C62300.....	93
E.	Análisis de costes.....	97
F.	Resumen de Normativas y Leyes .....	100
G.	Tablas de parámetros de ensayo dureza Brinell .....	101

## A. Hoja de ruta tecnológica

En esta hoja de ruta solo se refleja una operación de bruñido, con valores de velocidad de avance, longitud de mecanizado y tiempo de operación a modo de ejemplo, aplicable para todas las operaciones de este trabajo.



### Hoja de Ruta Tecnológica

Denominación pieza	Pieza Acero UNS G10380 - SIMPLEX A	Elaborado por	Ivan Gonzalez
Nº Plano		Fecha	21/03/2017
Material	Acero UNS G10380	Hoja/Total	1
Semiproducto	Barra sección rectangular 60,3x75,9mm		

Nº Fase	Croquis	Máquina / Descripción de la fase	Descripción herramienta	Parámetros de Corte						
				Vc (m/min)	a (mm/vuelta)	p (mm)	n (min-1)	Va (mm/min)	Lmec (mm)	tc (s)
1		Lagun MC600 Fresado conveccional Planeado de desbaste	Fresa Frontal ø80mm 3 Plaquitas	80	0,24	0,2	320	76,8	151,8	119
2		Lagun MC600 Fresado conveccional Planeado de acabado	Fresa Frontal ø80mm 3 Plaquitas	100,53	0,24	0,1	400	96	151,8	95
3		Lagun MC600 Bruñido con Bola	Herramienta de Bruñir Bola de ø10mm	-	-		-	630	245	20

## B. Código CNC

A continuación se adjunta el código utilizado para bruñir un área de sección cuadrada, de  $7\text{ mm}$  de lado. Para el resto de bruñidos realizados es el mismo código variando únicamente los parámetros de operación. Este código se ha elaborado en Excel, concatenando comandos y líneas de código.

### **;PRIMER CUADRADO**

```
N15 G01 X-2.5 Y2.5 Z1
G01 Z-3,7201
N20 G91 G01 X0 Y7
F300
X-0.2 Y0
X0 Y-7
X-0.2 Y0
[L#20]
#RPT[N25,[L#20],35]
G01 G90 Z10
[L#15]
#RPT[N15,[L#15],2]
```

### **;SEGUNDO CUADRADO**

```
N25 G01 X-12 Y2.5 Z1
G01 Z-2.0222
N30 G91 G01 X0 Y7
F300
X-0.25 Y0
X0 Y-7
X-0.25 Y0
[L#30]
#RPT[N30,[L#30],28]
G01 G90 Z10
[L#25]
#RPT[N30,[L#25],2]
```

### **;TERCER CUADRADO**

```
N35 G01 X-21.5 Y2.5 Z1
G01 Z-3.1112
N40 G91 G01 X0 Y7
F900
X-0.25 Y0
X0 Y-7
X-0.25 Y0
[L#40]
#RPT[N40,[L#40],28]
G01 G90 Z10
[L#35]
#RPT[N35,[L#35],2]
```

### **;CUARTO CUADRADO**

```
N45 G01 X-31 Y2.5 Z1
G01 Z-2.0222
N50 G91 G01 X0 Y7
F900
X-0.3 Y0
X0 Y-7
X-0.3 Y0
[L#50]
#RPT[N50,[L#50],23]
G01 G90 Z10
[L#45]
#RPT[N45,[L#45],2]
```

### **;QUINTO CUADRADO**

```
N55 G01 X-40.5 Y2.5 Z1
G01 Z-0.932
N60 G91 G01 X0 Y7
F300
X-0.25 Y0
X0 Y-7
X-0.25 Y0
[L#60]
#RPT[N60,[L#60],28]
G01 G90 Z10
[L#55]
#RPT[N55,[L#55],2]
```

## C. Resultados SIMPLEX

### i. Acero UNS G10380

Iteración	0	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS G10380 -	1	NS G10380-90-300-0	90,0	300	0,20	70%	0,699	0,699
	2	NS G10380-180-300-0	180,0	300	0,25	70%	0,708	0,708
	3	NS G10380-180-900-0	180,0	900	0,30	70%	0,787	0,787
	4	NS G10380-270-900-0	270,0	900	0,25	70%	1,045	1,045
	5	NS G10380-90-300-0	90,0	300	0,25	50%	1,182	1,182
<b>Factor</b>		<b>-1</b>						
<b>Reordenar</b>		SUMA	810,0	2700,0	1,3	330%		
		Mitjana	162,00	540,00	0,25	66%		
0,5		1,5	<b>Prova</b>	<b>270,00</b>	<b>900,00</b>	<b>0,25</b>	<b>60%</b>	<b>Factor</b>
		<b>UNS G10380-270-900-0</b>	<b>270,00</b>	<b>900,00</b>	<b>0,25</b>	<b>60%</b>	0,813	<b>2</b>

Iteración	1	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS G10380 -	1	NS G10380-90-300-0	90,0	300	0,20	70%	0,699	0,699
	2	NS G10380-180-300-0	180,0	300	0,25	70%	0,708	0,708
	3	NS G10380-180-900-0	180,0	900	0,30	70%	0,787	0,787
	4	NS G10380-270-900-0	270,0	900	0,25	70%	1,045	1,045
	5	NS G10380-270-900-0	270,0	900	0,25	60%	0,813	0,813
<b>Factor</b>		<b>2</b>						
<b>NO reordenar</b>		SUMA	990,0	3300,0	1,3	340%		
		Mitjana	198,00	660,00	0,25	68%		
-0,25		-2,25	<b>Estimación</b>	<b>360,00</b>	<b>1200,00</b>	<b>0,25</b>	<b>70%</b>	<b>Factor</b>
		<b>UNS G10380-360-1200-0</b>	<b>360,00</b>	<b>1200,00</b>	<b>0,25</b>	<b>70%</b>	0,682	<b>-1</b>

Iteración	2	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS G10380 -	1	NS G10380-360-1200-0	360,0	1200	0,25	70%	0,682	0,682
	2	NS G10380-90-300-0	90,0	300	0,20	70%	0,699	0,699
	3	NS G10380-180-300-0	180,0	300	0,25	70%	0,708	0,708
	4	NS G10380-180-900-0	180,0	900	0,30	70%	0,787	0,787
	5	NS G10380-270-900-0	270,0	900	0,25	70%	1,045	1,045
<b>Factor</b>		<b>-1</b>						
<b>Reordenar</b>		SUMA	1080,0	3600,0	1,3	350%		
		Mitjana	216,00	720,00	0,25	70%		
0,5		1,5	<b>Estimación</b>	<b>135,00</b>	<b>450,00</b>	<b>0,25</b>	<b>70%</b>	<b>Factor</b>
		<b>UNS G10380-135-450-0</b>	<b>135,00</b>	<b>450,00</b>	<b>0,25</b>	<b>70%</b>	0,533	<b>0,5</b>

Iteración	3	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material UNS G10380 -	1	NS G10380-360-1200-0	360,0	1200	0,25	70%	0,682	0,682
	2	NS G10380-90-300-0	90,0	300	0,20	70%	0,699	0,699
	3	NS G10380-180-300-0	180,0	300	0,25	70%	0,708	0,708
	4	NS G10380-180-900-0	180,0	900	0,30	70%	0,787	0,787
	5	NS G10380-135-450-0	135,0	450	0,25	70%	0,533	0,533
Factor		0,5	SUMA	945,0	3150,0	1,3	350%	
NO reordenar			Mitjana	189,00	630,00	0,25	70%	
0,125		-0,375	Estimación	168,75	562,50	0,25	70%	Factor
			UNS G10380-168,75-562,5	168,75	562,50	0,25	70%	-1
							0,713	0,713

Iteración	4	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material UNS G10380 -	1	NS G10380-135-450-0	135,0	450	0,25	70%	0,533	0,533
	2	NS G10380-360-1200-0	360,0	1200	0,25	70%	0,682	0,682
	3	NS G10380-90-300-0	90,0	300	0,20	70%	0,699	0,699
	4	NS G10380-180-300-0	180,0	300	0,25	70%	0,708	0,708
	5	G10380-168,75-562,5	168,8	563	0,25	70%	0,713	0,713
Factor		-1	SUMA	933,8	2812,5	1,2	350%	
Reordenar			Mitjana	186,75	562,50	0,24	70%	
0,5		1,5	Estimación	213,75	562,50	0,23	70%	Factor
			UNS G10380-213,75-562,5	213,75	562,50	0,23	70%	0,5
							0,692	0,692

Iteración	5	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material UNS G10380 -	1	NS G10380-135-450-0	135,0	450	0,25	70%	0,533	0,533
	2	NS G10380-360-1200-0	360,0	1200	0,25	70%	0,682	0,682
	3	NS G10380-90-300-0	90,0	300	0,20	70%	0,699	0,699
	4	NS G10380-180-300-0	180,0	300	0,25	70%	0,708	0,708
	5	G10380-213,75-562,5	213,8	563	0,23	70%	0,692	0,692
Factor		0,5	SUMA	978,8	2812,5	1,2	350%	
NO reordenar			Mitjana	195,75	562,50	0,24	70%	
0,125		-0,375	Estimación	202,50	562,50	0,23	70%	Factor
			UNS G10380-202,5-562,5	202,50	562,50	0,23	70%	-1
							0,417	0,417

Iteración	6	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS G10380 -	1	S G10380-202,5-562,5	202,5	563	0,23	70%	0,417	0,417
	2	NS G10380-135-450-0	135,0	450	0,25	70%	0,533	0,533
	3	NS G10380-360-1200-0	360,0	1200	0,25	70%	0,682	0,682
	4	NS G10380-90-300-0	90,0	300	0,20	70%	0,699	0,699
	5	NS G10380-180-300-0	180,0	300	0,25	70%	0,708	0,708
Factor		-1	SUMA	967,5	2812,5	1,2	350%	
Reordenar			Mitjana	193,50	562,50	0,24	70%	
0,5		1,5	Estimación	213,75	956,25	0,22	70%	Factor
		UNS G10380-213,75-956,2	213,75	956,25	0,22	70%	0,383	0,383
								Factor
								0,5

Iteración	7	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS G10380 -	1	G10380-213,75-956,2	213,8	956	0,22	70%	0,383	0,383
	2	S G10380-202,5-562,5	202,5	563	0,23	70%	0,417	0,417
	3	NS G10380-135-450-0	135,0	450	0,25	70%	0,533	0,533
	4	NS G10380-360-1200-0	360,0	1200	0,25	70%	0,682	0,682
	5	NS G10380-90-300-0	90,0	300	0,20	70%	0,699	0,699
Factor		0,5	SUMA	1001,3	3468,8	1,2	350%	
NO reordenar			Mitjana	200,25	693,75	0,23	70%	
0,125		-0,375	Estimación	158,91	546,09	0,22	70%	Factor
		UNS G10380-158,90625-546,0	158,91	546,09	0,22	70%	0,489	0,489
								Factor
								-1

Iteración	8	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS G10380 -	1	G10380-213,75-956,2	213,8	956	0,22	70%	0,383	0,383
	2	S G10380-202,5-562,5	202,5	563	0,23	70%	0,417	0,417
	3	G10380-158,91-546,0	158,9	546	0,22	70%	0,489	0,489
	4	NS G10380-135-450-0	135,0	450	0,25	70%	0,533	0,533
	5	NS G10380-360-1200-0	360,0	1200	0,25	70%	0,682	0,682
Factor		-1	SUMA	1070,2	3714,8	1,2	350%	
Reordenar			Mitjana	214,03	742,97	0,23	70%	
0,5		1,5	Estimación	-4,92	57,42	0,21	70%	Factor
		UNS G10380-4,92000000000007-57,42	-4,92	57,42	0,21	70%	1,058	1,058
								Factor
								2



Iteración	9	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	S G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
-	3	G10380-158,91-546,0	158,91	546,1	0,22	70%	0,489	0,489
	4	NS G10380-135-450-0	135,00	450	0,25	70%	0,533	0,533
	5	NS G10380-360-1200-0	360,00	1200	0,25	70%	0,682	0,682
Factor	2	SUMA	710,2	2514,8	0,9	280%		
NO reordenar		Mitjana	177,54	628,71	0,23	70%		
-0,25	-2,25	Estimación	126,21	383,79	0,33	40%		Factor
		UNS G10380-126,21-383,7	126,21	383,79	0,33	40%	0,921	0,921
								-1

Iteración	10	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	S G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
-	3	G10380-158,91-546,0	158,91	546,1	0,22	70%	0,489	0,489
	4	NS G10380-135-450-0	135,00	450	0,25	70%	0,533	0,533
	5	NS G10380-360-1200-0	360,00	1200	0,25	70%	0,682	0,682
Factor	-1	SUMA	1070,2	3714,8	1,2	350%		
Reordenar		Mitjana	214,03	742,97	0,23	70%		
0,5	1,5	Estimación	-4,92	57,42	0,21	70%		Factor
		UNS G10380-4,92000000000007-57,42	-4,92	57,42	0,21	70%	0,658	0,658
								2

Iteración	11	Código material	F	Va	0	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	S G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
-	3	G10380-158,91-546,0	158,91	546,1	0,22	70%	0,489	0,489
	4	NS G10380-135-450-0	135,00	450	0,25	70%	0,533	0,533
	5	NS G10380-200-750-0	200,00	750	0,21	70%	0,658	0,658
Factor	2	SUMA	910,2	3264,8	1,1	350%		
NO reordenar		Mitjana	182,03	652,97	0,23	70%		
-0,25	-2,25	Estimación	222,46	871,29	0,19	70%		Factor
		UNS G10380-222,46-871,2	222,46	871,29	0,19	70%	0,549	0,549
								-1

Iteración	12	Código material	F	Va	0	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	S G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
-	3	G10380-158,91-546,0	158,91	546,1	0,22	70%	0,489	0,489
	4	NS G10380-135-450-0	135,00	450	0,25	70%	0,533	0,533
	5	G10380-222,46-871,2	222,46	871	0,19	70%	0,549	0,549
Factor	-1	SUMA	932,6	3386,1	1,1	350%		
Reordenar		Mitjana	186,52	677,23	0,22	70%		
0,5	1,5	Estimación	132,62	386,13	0,27	70%		Factor
		UNS G10380-132,62-386,1	132,62	386,13	0,27	70%	0,568	0,568
								2

Iteración	13	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	S G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
-	3	G10380-158,91-546,0	158,91	546,1	0,22	70%	0,489	0,489
	4	NS G10380-135-450-0	135,00	450	0,25	70%	0,533	0,533
	5	G10380-222,46-871,2	222,46	871	0,19	70%	0,549	0,549
Factor	2	SUMA	932,6	3386,1	1,1	350%		
NO reordenar		Mitjana	186,52	677,23	0,22	70%		
-0,25	-2,25	Estimación	267,38	1113,87	0,15	70%		Factor
		UNS G10380-267,38-1113,8	267,38	1113,87	0,15	70%	0,476	0,476
								-1

Iteración	14	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	S G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
-	3	G10380-267,38-1113,8	267,38	1113,9	0,15	70%	0,476	0,476
	4	G10380-158,91-546,0	158,91	546	0,22	70%	0,489	0,489
	5	NS G10380-135-450-0	135,00	450	0,25	70%	0,533	0,533
Factor	-1	SUMA	977,5	3628,7	1,1	350%		
Reordenar		Mitjana	195,51	725,74	0,21	70%		
0,5	1,5	Estimación	286,27	1139,36	0,16	70%		Factor
		UNS G10380-286,27-1139,3	286,27	1139,36	0,16	70%	0,405	0,405
								0,5

Iteración	15	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
-	3	G10380-267,38-1113,8	267,38	1113,9	0,15	70%	0,476	0,476
	4	G10380-158,91-546,0	158,91	546	0,22	70%	0,489	0,489
	5	G10380-286,27-1139,3	286,27	1139	0,16	70%	0,405	0,405
<b>Factor</b>	<b>0,5</b>	SUMA	1128,8	4318,1	1,0	350%		
<b>NO reordenar</b>		Mitjana	225,76	863,61	0,20	70%		
0,125	-0,375	<b>Estimación</b>	<b>248,45</b>	<b>967,02</b>	<b>0,18</b>	<b>70%</b>		<b>Factor</b>
		<b>UNS G10380-248,4525-967,01</b>	<b>248,45</b>	<b>967,02</b>	<b>0,18</b>	<b>70%</b>	0,564	<b>-1</b>

Iteración	16	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	G10380-286,27-1139,3	286,27	1139,4	0,16	70%	0,405	0,405
-	3	G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
	4	G10380-267,38-1113,8	267,38	1114	0,15	70%	0,476	0,476
	5	G10380-158,91-546,0	158,91	546	0,22	70%	0,489	0,489
<b>Factor</b>	<b>-1</b>	SUMA	1128,8	4318,1	1,0	350%		
<b>Reordenar</b>		Mitjana	225,76	863,61	0,20	70%		
0,5	1,5	<b>Estimación</b>	<b>326,04</b>	<b>1339,90</b>	<b>0,16</b>	<b>70%</b>		<b>Factor</b>
		<b>UNS G10380-326,04-1339,89</b>	<b>326,04</b>	<b>1339,90</b>	<b>0,16</b>	<b>70%</b>	0,642	<b>2</b>

Iteración	17	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	G10380-286,27-1139,3	286,27	1139,4	0,16	70%	0,405	0,405
-	3	G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
	4	G10380-267,38-1113,8	267,38	1114	0,15	70%	0,476	0,476
	5	G10380-158,91-546,0	158,91	546	0,22	70%	0,489	0,489
<b>Factor</b>	<b>2</b>	SUMA	1128,8	4318,1	1,0	350%		
<b>NO reordenar</b>		Mitjana	225,76	863,61	0,20	70%		
-0,25	-2,25	<b>Estimación</b>	<b>75,35</b>	<b>149,19</b>	<b>0,25</b>	<b>70%</b>		<b>Factor</b>
		<b>UNS G10380-75,345-149,186</b>	<b>75,35</b>	<b>149,19</b>	<b>0,25</b>	<b>70%</b>	0,636	<b>-1</b>

Iteración	18	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	G10380-286,27-1139,3	286,27	1139,4	0,16	70%	0,405	0,405
-	3	G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
	4	G10380-267,38-1113,8	267,38	1114	0,15	70%	0,476	0,476
	5	G10380-158,91-546,0	158,91	546	0,22	70%	0,489	0,489
Factor	-1	SUMA	1128,8	4318,1	1,0	350%		
Reordenar		Mitjana	225,76	863,61	0,20	70%		
0,5	1,5	Estimación	326,04	1339,90	0,16	70%		Factor
		UNS G10380-326,04-1339,89	326,04	1339,90	0,16	70%	0,480	0,480
								2

Iteración	19	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	G10380-286,27-1139,3	286,27	1139,4	0,16	70%	0,405	0,405
-	3	G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
	4	G10380-267,38-1113,8	267,38	1114	0,15	70%	0,476	0,476
	5	G10380-326,04-1339,89	326,04	1340	0,16	70%	0,480	0,480
Factor	2	SUMA	1295,9	5111,9	0,9	350%		
NO reordenar		Mitjana	259,19	1022,37	0,18	70%		
-0,25	-2,25	Estimación	409,61	1736,80	0,13	70%		Factor
		UNS G10380-409,605-1736,80	409,61	1736,80	0,13	70%	0,443	0,443
								-1

Iteración	20	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	G10380-286,27-1139,3	286,27	1139,4	0,16	70%	0,405	0,405
-	3	G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
	4	G10380-409,605-1736,80	409,61	1737	0,13	70%	0,443	0,443
	5	G10380-267,38-1113,8	267,38	1114	0,15	70%	0,476	0,476
Factor	-1	SUMA	1379,5	5508,8	0,9	350%		
Reordenar		Mitjana	275,90	1101,76	0,18	70%		
0,5	1,5	Estimación	288,68	1083,58	0,22	70%		Factor
		UNS G10380-288,6825-1083,58	288,68	1083,58	0,22	70%	0,662	0,662
								2

Iteración	21	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	G10380-286,27-1139,3	286,27	1139,4	0,16	70%	0,405	0,405
-	3	G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
	4	G10380-409,605-1736,80	409,61	1737	0,13	70%	0,443	0,443
	5	G10380-267,38-1113,8	267,38	1114	0,15	70%	0,476	0,476
<b>Factor</b>	<b>2</b>	SUMA	1379,5	5508,8	0,9	350%		
<b>NO reordenar</b>		Mitjana	275,90	1101,76	0,18	70%		
-0,25	-2,25	<b>Estimación</b>	<b>256,73</b>	<b>1129,01</b>	<b>0,12</b>	<b>70%</b>		<b>Factor</b>
		<b>UNS G10380-256,72875-1129,01</b>	<b>256,73</b>	<b>1129,01</b>	<b>0,12</b>	<b>70%</b>	0,440	0,440
								<b>-1</b>

Iteración	22	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	G10380-286,27-1139,3	286,27	1139,4	0,16	70%	0,405	0,405
-	3	G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
	4	G10380-409,605-1736,80	409,61	1737	0,13	70%	0,443	0,443
	5	G10380-256,72875-1129,01	256,73	1129	0,12	70%	0,440	0,440
<b>Factor</b>	<b>0</b>	SUMA	1368,9	5523,9	0,9	350%		
<b>NO reordenar</b>		Mitjana	273,77	1104,78	0,17	70%		
0,25	0,25	<b>Estimación</b>	<b>278,03</b>	<b>1098,73</b>	<b>0,19</b>	<b>70%</b>		<b>Factor</b>
		<b>UNS G10380-278,03125-1098,72</b>	<b>278,03</b>	<b>1098,73</b>	<b>0,19</b>	<b>70%</b>	0,553	0,553
								<b>-1</b>

Iteración	23	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	G10380-286,27-1139,3	286,27	1139,4	0,16	70%	0,405	0,405
-	3	G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
	4	G10380-256,72875-1129,01	256,73	1129	0,12	70%	0,440	0,440
	5	G10380-409,605-1736,80	409,61	1737	0,13	70%	0,443	0,443
<b>Factor</b>	<b>-1</b>	SUMA	1368,9	5523,9	0,9	350%		
<b>Reordenar</b>		Mitjana	273,77	1104,78	0,17	70%		
0,5	1,5	<b>Estimación</b>	<b>70,02</b>	<b>156,76</b>	<b>0,23</b>	<b>70%</b>		<b>Factor</b>
		<b>UNS G10380-70,0193750000001-156</b>	<b>70,02</b>	<b>156,76</b>	<b>0,23</b>	<b>70%</b>	0,428	0,428
								<b>2</b>

Iteración	24	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	G10380-286,27-1139,3	286,27	1139,4	0,16	70%	0,405	0,405
-	3	G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
	4	80-256,72875-1129,01	256,73	1129	0,12	70%	0,440	0,440
	5	0,0193750000001-156	70,02	157	0,23	70%	0,428	0,428
Factor	2	SUMA	1029,3	3943,9	1,0	350%		
NO reordenar		Mitjana	205,85	788,78	0,19	70%		
-0,25	-2,25	Estimación	-99,77	-633,26	0,28	70%		Factor
		UNS G10380-99,7734374999998-633	-99,77	-633,26	0,28	70%	0,846	0,846
								-1

Iteración	25	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	G10380-286,27-1139,3	286,27	1139,4	0,16	70%	0,405	0,405
-	3	G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
	4	0,0193750000001-156	70,02	157	0,23	70%	0,428	0,428
	5	80-256,72875-1129,01	256,73	1129	0,12	70%	0,440	0,440
Factor	-1	SUMA	1029,3	3943,9	1,0	350%		
Reordenar		Mitjana	205,85	788,78	0,19	70%		
0,5	1,5	Estimación	129,54	278,42	0,31	70%		Factor
		UNS G10380-129,5409375-278,4180	129,54	278,42	0,31	70%	0,545	0,545
								2

Iteración	26	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	G10380-286,27-1139,3	286,27	1139,4	0,16	70%	0,405	0,405
-	3	G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
	4	0,0193750000001-156	70,02	157	0,23	70%	0,428	0,428
	5	80-256,72875-1129,01	256,73	1129	0,12	70%	0,440	0,440
Factor	2	SUMA	1029,3	3943,9	1,0	350%		
NO reordenar		Mitjana	205,85	788,78	0,19	70%		
-0,25	-2,25	Estimación	320,32	1554,31	0,02	70%		Factor
		UNS G10380-320,32265625-1554,31	320,32	1554,31	0,02	70%	1,061	1,061
								-1

Iteración	27	Código material	F	Va	b	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	G10380-213,75-956,2	213,75	956,3	0,22	70%	0,383	0,383
UNS G10380	2	G10380-286,27-1139,3	286,27	1139,4	0,16	70%	0,405	0,405
-	3	G10380-202,5-562,5	202,50	562,5	0,23	70%	0,417	0,417
	4	0,0193750000001-156	70,02	157	0,23	70%	0,428	0,428
	5	80-256,72875-1129,01	256,73	1129	0,12	70%	0,440	0,440
Factor	-1	SUMA	1029,3	3943,9	1,0	350%		
Reordenar		Mitjana	205,85	788,78	0,19	70%		
0,5	1,5	Estimación	129,54	278,42	0,31	70%		Factor
		UNS G10380-129,5409375-278,4180	129,54	278,42	0,31	70%	0,470	0,470
								2

## ii. Aluminio UNS A9204 SIMPLEX A

Iteración	0	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	NS A9204-60-600-0,2	60,0	600	0,25	25%	0,857	0,857
UNS A9204	2	NS A9204-90-300-0,1	90,0	300	0,15	50%	1,220	1,220
-	3	NS A9204-90-900-0,7	90,0	900	0,15	75%	1,367	1,367
	4	NS A9204-120-300-0,1	120,0	300	0,20	50%	1,526	1,526
	5	NS A9204-120-600-0,1	120,0	600	0,20	75%	1,923	1,923
Factor	-1	SUMA	480,0	2700,0	1,0	275%		
Reordenar		Mitjana	96,00	540,00	0,19	55%		
0,5	1,5	Prova	60,00	900	0,18	30%		Factor
		UNS A9204-60-900-0,1	60,00	900	0,18	30%	0,839	0,839
								0,5

Iteración	1	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	NS A9204-90-300-0,1	90,0	300	0,15	50%	1,220	1,220
UNS A9204	2	NS A9204-120-600-0,1	120,0	600	0,20	75%	1,923	1,923
-	3	NS A9204-60-600-0,2	60,0	600	0,25	25%	0,857	0,857
	4	NS A9204-90-900-0,7	90,0	900	0,15	75%	1,367	1,367
	5	NS A9204-60-900-0,1	60,0	900	0,18	30%	0,839	0,839
Factor	0,5	SUMA	420,0	3300,0	0,9	255%		
NO reordenar		Mitjana	84,00	660,00	0,19	51%		
0,125	-0,375	Estimación	75,00	750	0,18	20%		Factor
		UNS A9204-75-750-0,1	75,00	750	0,18	20%	0,915	0,915
								-1

Iteración	2	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS A92024 -	1	JNS A92024-60-900-0,1	60,0	900	0,18	30%	0,839	0,839
	2	NS A92024-60-600-0,2	60,0	600	0,25	25%	0,857	0,857
	3	JNS A92024-75-750-0,1	75,0	750	0,18	20%	0,915	0,915
	4	JNS A92024-90-300-0,1	90,0	300	0,15	50%	1,220	1,220
	5	NS A92024-90-900-0,7	90,0	900	0,15	75%	1,367	1,367
Factor	-1	SUMA	375,0	3450,0	0,9	200%		
Reordenar		Mitjana	75,00	690,00	0,18	40%		
0,5	1,5	Estimación	52,50	375	0,23	30%		Factor
		UNS A92024-52,5-375-0	52,50	375	0,23	30%	0,987	0,987
								2

Iteración	3	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS A92024 -	1	JNS A92024-60-900-0,1	60,0	900	0,18	30%	0,839	0,839
	2	NS A92024-60-600-0,2	60,0	600	0,25	25%	0,857	0,857
	3	JNS A92024-75-750-0,1	75,0	750	0,18	20%	0,915	0,915
	4	JNS A92024-90-300-0,1	90,0	300	0,15	50%	1,220	1,220
	5	NS A92024-52,5-375-0	52,5	375	0,23	30%	0,987	0,987
Factor	2	SUMA	337,5	2925,0	1,0	155%		
NO reordenar		Mitjana	67,50	585,00	0,20	31%		
-0,25	-2,25	Estimación	33,75	113	0,27	0%		Factor
		UNS A92024-33,75-112,5	33,75	113	0,27	0%	0,964	0,964
								-1

Iteración	4	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS A92024 -	1	JNS A92024-60-900-0,1	60,0	900	0,18	30%	0,839	0,839
	2	NS A92024-60-600-0,2	60,0	600	0,25	25%	0,857	0,857
	3	JNS A92024-75-750-0,1	75,0	750	0,18	20%	0,915	0,915
	4	S A92024-33,75-112,5	33,8	113	0,27	50%	0,964	0,964
	5	NS A92024-52,5-375-0	52,5	375	0,23	30%	0,987	0,987
Factor	-1	SUMA	281,3	2737,5	1,1	155%		
Reordenar		Mitjana	56,25	547,50	0,22	31%		
0,5	1,5	Estimación	61,88	806	0,21	0%		Factor
		UNS A92024-61,875-806,2	61,88	806	0,21	0%	1,328	1,328
								2



Iteración	5	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material UNS A92024	1	JNS A92024-60-900-0,1	60,0	900	0,18	30%	0,839	0,839
	2	NS A92024-60-600-0,2	60,0	600	0,25	25%	0,857	0,857
	3	JNS A92024-75-750-0,1	75,0	750	0,18	20%	0,915	0,915
	4	S A92024-33,75-112,5	33,8	113	0,27	50%	0,964	0,964
	5	NS A92024-52,5-375-0	52,5	375	0,23	30%	0,987	0,987
Factor	2	SUMA	281,3	2737,5	1,1	155%		
NO reordenar		Mitjana	56,25	547,50	0,22	31%		
-0,25	-2,25	Estimación	47,81	159	0,24	0%		Factor
		UNS A92024-47,8125-159,3	47,81	159	0,24	0%	0,930	0,930
								-1

Iteración	6	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material UNS A92024	1	JNS A92024-60-900-0,1	60,0	900	0,18	30%	0,839	0,839
	2	NS A92024-60-600-0,2	60,0	600	0,25	25%	0,857	0,857
	3	JNS A92024-75-750-0,1	75,0	750	0,18	20%	0,915	0,915
	4	A92024-47,8125-159,3	47,8	159	0,24	50%	0,930	0,930
	5	S A92024-33,75-112,5	33,8	113	0,27	50%	0,964	0,964
Factor	-1	SUMA	276,6	2521,9	1,1	175%		
Reordenar		Mitjana	55,31	504,38	0,22	35%		
0,5	1,5	Estimación	87,66	1092	0,15	10%		Factor
		UNS A92024-87,65625-1092,1	87,66	1092	0,15	10%	1,007	1,007
								2

Iteración	7	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material UNS A92024	1	JNS A92024-60-900-0,1	60,0	900	0,18	30%	0,839	0,839
	2	NS A92024-60-600-0,2	60,0	600	0,25	25%	0,857	0,857
	3	JNS A92024-75-750-0,1	75,0	750	0,18	20%	0,915	0,915
	4	A92024-47,8125-159,3	47,8	159	0,24	50%	0,930	0,930
	5	S A92024-33,75-112,5	33,8	113	0,27	50%	0,964	0,964
Factor	2	SUMA	276,6	2521,9	1,1	175%		
NO reordenar		Mitjana	55,31	504,38	0,22	35%		
-0,25	-2,25	Estimación	6,80	-377	0,32	10%		Factor
		UNS A92024-6,796875-377,34	6,80	-377	0,32	10%	1,499	1,499
								-1

0,12533333



Iteración	8	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F	
Material	1	JNS A92024-60-900-0,1	60,0	900	0,18	30%	0,839	0,839	0,12533333
UNS A92024	2	NS A92024-60-600-0,2	60,0	600	0,25	25%	0,857	0,857	
-	3	JNS A92024-75-750-0,1	75,0	750	0,18	20%	0,915	0,915	
	4	A92024-47,8125-159,3	47,8	159	0,24	50%	0,930	0,930	
	5	S A92024-33,75-112,5	33,8	113	0,27	50%	0,964	0,964	
Factor	-1	SUMA	276,6	2521,9	1,1	175%			
Reordenar		Mitjana	55,31	504,38	0,22	35%			
0,5	1,5	Estimación	87,66	1092	0,15	10%			Factor
		UNS A92024-87,65625-1092,1	87,66	1092	0,15	10%	0,910	0,910	0,5

Iteración	9	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F	
Material	1	JNS A92024-60-900-0,1	60,0	900	0,18	30%	0,839	0,84	0,09100000
UNS A92024	2	NS A92024-60-600-0,2	60,0	600	0,25	25%	0,857	0,86	
-	3	JNS A92024-75-750-0,1	75,0	750	0,18	20%	0,915	0,92	
	4	A92024-47,8125-159,3	47,8	159	0,24	50%	0,930	0,93	
	5	2024-87,65625-1092,1	87,7	1092	0,15	50%	0,910	0,91	
Factor	0,5	SUMA	242,8	2409,4	0,8	125%			
NO reordenar		Mitjana	60,70	602,34	0,21	31%			
0,125	-0,375	Estimación	48,28	360,94	0,19	30%			Factor
		UNS A92024-48,28125-360,9	48,28	360,94	0,19	30%	1,0410	1,04	-1

Iteración	10	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F	
Material	1	JNS A92024-60-900-0,1	60,0	900	0,18	30%	0,839	0,84	0,09100000
UNS A92024	2	NS A92024-60-600-0,2	60,0	600	0,25	25%	0,857	0,86	
-	3	2024-87,65625-1092,1	87,7	1092	0,15	50%	0,910	0,91	
	4	JNS A92024-75-750-0,1	75,0	750	0,18	20%	0,915	0,92	
	5	A92024-47,8125-159,3	47,8	159	0,24	50%	0,930	0,93	
Factor	-1	SUMA	330,5	3501,6	1,0	175%			
Reordenar		Mitjana	66,09	700,31	0,20	35%			
0,5	1,5	Estimación	93,52	1511,72	0,14	60%			Factor
		UNS A92024-93,515625-1511,7	93,52	1511,72	0,14	60%	0,855	0,855	0,5

Iteración	11	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F	
Material	1	JNS A92024-60-900-0,2	60,0	900	0,18	30%	0,839	0,84	0,07633333
UNS A92024	2	NS A92024-60-600-0,2	60,0	600	0,25	25%	0,857	0,86	
-	3	2024-87,65625-1092,1	87,7	1092	0,15	50%	0,910	0,91	
	4	JNS A92024-75-750-0,1	75,0	750	0,18	20%	0,915	0,92	
	5	024-93,515625-1511,7	93,5	1512	0,14	60%	0,855	0,86	
<b>Factor</b>	<b>0,5</b>	SUMA	376,2	4853,9	0,9	185%			
<b>NO reordenar</b>		Mitjana	75,23	970,78	0,18	37%			
0,125	-0,375	<b>Estimación</b>	<b>82,09</b>	<b>1173,63</b>	<b>0,17</b>	<b>60%</b>			<b>Factor</b>
		<b>UNS A92024-82,08984375-1173,6</b>	<b>82,09</b>	<b>1173,63</b>	<b>0,17</b>	<b>60%</b>	0,970	0,970	<b>-1</b>

Iteración	12	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F	
Material	1	JNS A92024-60-900-0,2	60,0	900	0,18	30%	0,839	0,84	0,07633333
UNS A92024	2	024-93,515625-1511,7	93,5	1512	0,14	60%	0,855	0,86	
-	3	NS A92024-60-600-0,2	60,0	600	0,25	25%	0,857	0,86	
	4	2024-87,65625-1092,1	87,7	1092	0,15	50%	0,910	0,91	
	5	JNS A92024-75-750-0,1	75,0	750	0,18	20%	0,915	0,92	
<b>Factor</b>	<b>-1</b>	SUMA	376,2	4853,9	0,9	185%			
<b>Reordenar</b>		Mitjana	75,23	970,78	0,18	37%			
0,5	1,5	<b>Estimación</b>	<b>75,59</b>	<b>1301,95</b>	<b>0,18</b>	<b>20%</b>			<b>Factor</b>
		<b>UNS A92024-75,5859375-1301,9</b>	<b>75,59</b>	<b>1301,95</b>	<b>0,18</b>	<b>20%</b>	0,850	0,850	<b>0,5</b>

Iteración	13	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F	
Material	1	JNS A92024-60-900-0,2	60,0	900	0,18	30%	0,839	0,84	0,07100000
UNS A92024	2	024-93,515625-1511,7	93,5	1512	0,14	60%	0,855	0,86	
-	3	NS A92024-60-600-0,2	60,0	600	0,25	25%	0,857	0,86	
	4	2024-87,65625-1092,1	87,7	1092	0,15	50%	0,910	0,91	
	5	24-75,5859375-1301,9	75,6	1302	0,18	20%	0,850	0,85	
<b>Factor</b>	<b>0,5</b>	SUMA	376,8	5405,9	0,9	185%			
<b>NO reordenar</b>		Mitjana	75,35	1081,17	0,18	37%			
0,125	-0,375	<b>Estimación</b>	<b>75,44</b>	<b>1163,96</b>	<b>0,18</b>	<b>20%</b>			<b>Factor</b>
		<b>UNS A92024-75,439453125-1163,9</b>	<b>75,44</b>	<b>1163,96</b>	<b>0,18</b>	<b>20%</b>	0,895	0,895	<b>-1</b>

Iteración	14	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F	
Material	1	UNS A92024-60-900-0,2	60,0	900	0,18	30%	0,839	0,84	0,05666667
UNS A92024	2	24-75,5859375-1301,9	75,6	1302	0,18	20%	0,850	0,85	
-	3	024-93,515625-1511,7	93,5	1512	0,14	60%	0,855	0,86	
	4	NS A92024-60-600-0,2	60,0	600	0,25	25%	0,857	0,86	
	5	75,439453125-1163,9	75,4	1164	0,18	20%	0,895	0,90	
Factor	-1	SUMA	364,5	5477,6	0,9	155%			
Reordenar		Mitjana	72,91	1095,53	0,19	31%			
0,5	1,5	Estimación	69,11	992,87	0,19	40%			Factor
		UNS A92024-69,111328125-992,8	69,11	992,87	0,19	40%		-	0,5

## iii. Aluminio UNS A92024 SIMPLEX B

Iteración	0	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F	
Material	1	NS A92024-60-300-0,2	60,0	300	0,15	25%	0,788	0,788	
UNS A92024	2	NS A92024-60-900-0,7	60,0	900	0,25	75%	0,926	0,926	
-	3	NS A92024-90-600-0,7	90,0	600	0,20	50%	0,955	0,955	
	4	NS A92024-120-300-0,7	120,0	300	0,15	50%	1,101	1,101	
	5	NS A92024-120-900-0,7	120,0	900	0,25	75%	1,391	1,391	
Factor	-1	SUMA	450,0	3000,0	1,0	275%			
Reordenar		Mitjana	90,00	600,00	0,20	55%			
0,5	1,5	Prova	45,00	1050	0,28	25%			Factor
		UNS A92024-45-1050-0,7	45,00	1050	0,28	25%	0,953	0,953	0,5

Iteración	1	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F	
Material	1	NS A92024-60-300-0,2	60,0	300	0,15	25%	0,788	0,788	
UNS A92024	2	NS A92024-90-600-0,7	90,0	600	0,20	50%	0,955	0,955	
-	3	NS A92024-120-900-0,7	120,0	900	0,25	75%	1,391	1,391	
	4	NS A92024-60-900-0,7	60,0	900	0,25	75%	0,926	0,926	
	5	NS A92024-45-1050-0,7	45,0	1050	0,28	25%	0,953	0,953	
Factor	0,5	SUMA	375,0	3750,0	1,1	250%			
NO reordenar		Mitjana	75,00	750,00	0,23	50%			
0,125	-0,375	Estimación	63,75	863	0,24	41%			Factor
		UNS A92024-63,75-862,5-0,7	63,75	863	0,24	41%	1,059	1,059	-1

Iteración	2	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material UNS A92024 -	1	NS A92024-60-300-0,2	60,0	300	0,15	25%	0,788	0,788
	2	NS A92024-45-1050-0,7	45,0	1050	0,28	25%	0,953	0,953
	3	NS A92024-60-900-0,7	60,0	900	0,25	75%	0,926	0,926
	4	NS A92024-90-600-0,7	90,0	600	0,20	50%	0,955	0,955
	5	A92024-63,75-862,5-0,7	63,8	863	0,24	41%	1,059	1,059
Factor	-1	SUMA	318,8	3712,5	1,1	216%		
Reordenar		Mitjana	63,75	742,50	0,22	43%		
0,5	1,5	Estimación	63,75	563	0,19	47%		Factor
		UNS A92024-63,75-562,5-0,7	63,75	563	0,19	47%	0,889	0,889
								0,5

Iteración	3	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material UNS A92024 -	1	NS A92024-60-300-0,2	60,0	300	0,15	25%	0,788	0,788
	2	NS A92024-45-1050-0,7	45,0	1050	0,28	25%	0,953	0,953
	3	NS A92024-60-900-0,7	60,0	900	0,25	75%	0,926	0,926
	4	NS A92024-90-600-0,7	90,0	600	0,20	50%	0,955	0,955
	5	A92024-63,75-562,5-0,7	63,8	563	0,19	47%	0,889	0,889
Factor	0,5	SUMA	318,8	3412,5	1,1	222%		
NO reordenar		Mitjana	63,75	682,50	0,21	44%		
0,125	-0,375	Estimación	63,75	638	0,21	45%		Factor
		UNS A92024-63,75-637,5-0,4	63,75	638	0,21	45%	0,820	0,820
								-1

Iteración	4	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material UNS A92024 -	1	NS A92024-60-300-0,2	60,0	300	0,15	25%	0,788	0,788
	2	A92024-63,75-637,5-0,4	63,8	638	0,21	45%	0,820	0,820
	3	A92024-63,75-562,5-0,7	63,8	563	0,19	47%	0,889	0,889
	4	NS A92024-45-1050-0,7	45,0	1050	0,28	25%	0,953	0,953
	5	NS A92024-60-900-0,7	60,0	900	0,25	75%	0,926	0,926
Factor	-1	SUMA	292,5	3450,0	1,1	217%		
Reordenar		Mitjana	58,50	690,00	0,22	43%		
0,5	1,5	Estimación	56,25	375	0,16	-4%		Factor
		UNS A92024-56,25-375-0,03	56,25	375	0,16	-4%	0,862	0,862
								0,5

Iteración	5	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS A92024	1	NS A92024-60-300-0,2	60,0	300	0,15	25%	0,788	0,788
	2	92024-63,75-637,5-0,4	63,8	638	0,21	45%	0,820	0,820
	3	A92024-63,75-562,5-0,1	63,8	563	0,19	47%	0,889	0,889
	4	NS A92024-45-1050-0,1	45,0	1050	0,28	25%	0,953	0,953
	5	NS A92024-56,25-375-0,1	56,3	375	0,16	50%	0,862	0,862
Factor	0,5	SUMA	288,8	2925,0	1,0	192%		
NO reordenar		Mitjana	57,75	585,00	0,20	38%		
0,125	-0,375	Estimación	57,19	506	0,18	43%		Factor
		UNS A92024-57,1875-506,25-0,4	57,19	506	0,18	43%	0,936	0,936
								-1

Iteración	6	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS A92024	1	NS A92024-60-300-0,2	60,0	300	0,15	25%	0,788	0,788
	2	92024-63,75-637,5-0,4	63,8	638	0,21	45%	0,820	0,820
	3	IS A92024-56,25-375-0,1	56,3	375	0,16	50%	0,862	0,862
	4	A92024-63,75-562,5-0,1	63,8	563	0,19	47%	0,889	0,889
	5	A24-57,1875-506,25-0,4	57,2	506	0,18	43%	0,936	0,936
Factor	-1	SUMA	300,9	2381,3	0,9	210%		
Reordenar		Mitjana	60,19	476,25	0,18	42%		
0,5	1,5	Estimación	64,69	431	0,17	41%		Factor
		UNS A92024-64,6875-431,25-0,4	64,69	431	0,17	41%	0,778	0,778
								0,5

Iteración	7	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS A92024	1	NS A92024-60-300-0,2	60,0	300	0,15	25%	0,788	0,788
	2	92024-63,75-637,5-0,4	63,8	638	0,21	45%	0,820	0,820
	3	IS A92024-56,25-375-0,1	56,3	375	0,16	50%	0,862	0,862
	4	A92024-63,75-562,5-0,1	63,8	563	0,19	47%	0,889	0,889
	5	A24-64,6875-431,25-0,4	64,7	431	0,17	41%	0,778	0,778
Factor	0,5	SUMA	308,4	2306,3	0,9	208%		
NO reordenar		Mitjana	61,69	461,25	0,18	42%		
0,125	-0,375	Estimación	62,81	450	0,18	41%		Factor
		UNS A92024-62,8125-450-0,413	62,81	450	0,18	41%	0,892	0,892
								-1

Iteración	8	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	24-64,6875-431,25-0,4	64,7	431	0,17	41%	0,778	0,778
UNS A92024	2	NS A92024-60-300-0,2	60,0	300	0,15	25%	0,788	0,788
-	3	92024-63,75-637,5-0,4	63,8	638	0,21	45%	0,820	0,820
	4	IS A92024-56,25-375-0,4	56,3	375	0,16	50%	0,862	0,862
	5	A92024-63,75-562,5-0,4	63,8	563	0,19	47%	0,889	0,889
Factor	-1	SUMA	308,4	2306,3	0,9	208%		
Reordenar		Mitjana	61,69	461,25	0,18	42%		
0,5	1,5	Estimación	58,59	309	0,15	34%		Factor
		UNS A92024-58,59375-309,375-0,4	58,59	309	0,15	34%	0,782	0,782
								0,5

Iteración	9	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	24-64,6875-431,25-0,4	64,7	431,25	0,17	41%	0,778	0,7783
UNS A92024	2	NS A92024-60-300-0,2	60,0	300,00	0,15	25%	0,788	0,7877
-	3	92024-63,75-637,5-0,4	63,8	637,50	0,21	45%	0,820	0,8200
	4	IS A92024-56,25-375-0,4	56,3	375,00	0,16	50%	0,862	0,8620
	5	A-58,59375-309,375-0,4	58,6	309,38	0,15	34%	0,782	0,7823
Factor	0,5	SUMA	244,7	1743,8	0,7	1,6		
NO reordenar		Mitjana	61,2	435,9	0,2	0,4		
0,125	-0,375	Estimación	51,68	358,59	0,15	39%		Factor
		UNS A92024-51,6796875-358,59375-0,4	51,68	358,59	0,15	39%	0,808	0,8083
								-1

Iteración	10	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	24-64,6875-431,25-0,4	64,7	431,25	0,17	41%	0,778	0,78
UNS A92024	2	A-58,59375-309,375-0,4	58,6	309,38	0,15	34%	0,782	0,78
-	3	NS A92024-60-300-0,2	60,0	300,00	0,15	25%	0,788	0,79
	4	A6796875-358,59375-0,4	51,7	358,59	0,15	39%	0,808	0,81
	5	92024-63,75-637,5-0,4	63,8	637,50	0,21	45%	0,820	0,82
Factor	-1	SUMA	298,7	2036,7	0,8	1,8		
Reordenar		Mitjana	59,7	407,3	0,2	0,4		
0,5	1,5	Estimación	53,73	62,11	0,10	24%		Factor
		UNS A92024-53,73046875-62,109375-0,4	53,73	62,11	0,10	24%	0,781	0,781
								0,5

Iteración	11	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material	1	24-64,6875-431,25-0,4	64,7	431,25	0,17	41%	0,778	0,78
UNS A92024	2	4-58,59375-309,375-0,1	58,6	309,38	0,15	34%	0,782	0,78
-	3	NS A92024-60-300-0,2	60,0	300,00	0,15	25%	0,788	0,79
	4	6796875-358,59375-0,1	51,7	358,59	0,15	39%	0,808	0,81
	5	73046875-62,109375-0,1	53,7	62,11	0,10	24%	0,781	0,78
Factor	0,5	SUMA	288,7	1461,3	0,7	1,6		
NO reordenar		Mitjana	57,7	292,3	0,1	0,3		
0,125	-0,375	Estimación	56,24	205,96	0,13	29%		Factor
UNS A92024-56,2353515625-205,95703125			56,24	205,96	0,13	29%	0,794	0,794
								-1

Iteración	12	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material	1	24-64,6875-431,25-0,4	64,7	431,25	0,17	41%	0,778	0,78
UNS A92024	2	73046875-62,109375-0,1	53,7	62,11	0,10	24%	0,781	0,78
-	3	4-58,59375-309,375-0,1	58,6	309,38	0,15	34%	0,782	0,78
	4	NS A92024-60-300-0,2	60,0	300,00	0,15	25%	0,788	0,79
	5	515625-205,95703125	56,2	205,96	0,13	29%	0,794	0,79
Factor	-1	SUMA	293,2	1308,7	0,7	1,5		
Reordenar		Mitjana	58,6	261,7	0,1	0,3		
0,5	1,5	Estimación	62,27	345,41	0,16	32%		Factor
UNS A92024-62,2705078125-345,41015625			62,27	345,41	0,16	32%	0,841	0,841
								2

Iteración	13	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material	1	24-64,6875-431,25-0,4	64,7	431,25	0,17	41%	0,778	0,78
UNS A92024	2	73046875-62,109375-0,1	53,7	62,11	0,10	24%	0,781	0,78
-	3	4-58,59375-309,375-0,1	58,6	309,38	0,15	34%	0,782	0,78
	4	NS A92024-60-300-0,2	60,0	300,00	0,15	25%	0,788	0,79
	5	515625-205,95703125	56,2	205,96	0,13	29%	0,794	0,79
Factor	2	SUMA	293,2	1308,7	0,7	1,5		
NO reordenar		Mitjana	58,6	261,7	0,1	0,3		
-0,25	-2,25	Estimación	53,22	136,23	0,11	28%		Factor
UNS A92024-53,2177734375-136,23046875			53,22	136,23	0,11	28%	0,834	0,834
								-1



Iteración	14	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	24-64,6875-431,25-0,4	64,7	431,25	0,17	41%	0,778	0,78
UNS A92024	2	73046875-62,109375-0	53,7	62,11	0,10	24%	0,781	0,78
-	3	4-58,59375-309,375-0,1	58,6	309,38	0,15	34%	0,782	0,78
	4	NS A92024-60-300-0,2	60,0	300,00	0,15	25%	0,788	0,79
	5	515625-205,95703125	56,2	205,96	0,13	29%	0,794	0,79
Factor	-1	SUMA	293,2	1308,7	0,7	1,5		
Reordenar		Mitjana	58,6	261,7	0,1	0,3		
0,5	1,5	Estimación	62,27	345,41	0,16	32%		Factor
UNS A92024-62,2705078125-345,41015625			62,27	345,41	0,16	32%		0,5

#### iv. Bronce Aluminio UNS C62300 SIMPLEX A

Iteración	0	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	NS C62300-96-900-0,7	96,0	900	0,16	75%	0,597	0,597
UNS C62300	2	Br9Al-232,8-600-0,5	232,8	600	0,19	50%	0,829	0,829
-	3	NS C62300-374-300-0,1	374,0	300	0,15	25%	0,837	0,837
	4	NS C62300-116-600-0	116,0	600	0,20	50%	0,885	0,885
	5	NS C62300-345-900-0,1	345,0	900	0,23	75%	1,056	1,056
Factor	-1	SUMA	1163,8	3300,0	0,9	275%		
Reordenar		Mitjana	232,76	660,00	0,19	55%		
0,5	1,5	Prova	64,40	300	0,19	60%		Factor
		Br9Al-64,4-300-0,6	64,40	300	0,19	60%	0,684	0,684
								0,5

Iteración	1	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	NS C62300-96-900-0,7	96,0	900	0,16	75%	0,597	0,597
UNS C62300	2	S C62300-232,75-600-0,5	232,8	600	0,19	50%	0,829	0,829
-	3	NS C62300-374-300-0,1	374,0	300	0,15	25%	0,837	0,837
	4	NS C62300-116-600-0	116,0	600	0,20	50%	0,885	0,885
	5	S C62300-232,75-300-0,1	232,8	300	0,19	60%	0,684	0,684
Factor	0,5	SUMA	1051,5	2700,0	0,9	260%		
NO reordenar		Mitjana	210,30	540,00	0,18	52%		
0,125	-0,375	Estimación	218,72	450	0,18	60%		Factor
UNS C62300-218,71875-45			218,72	450	0,18	60%	0,579	0,579
								-1

Iteración	2	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS C62300 -	1	C62300-218,71875-45	218,7	450	0,18	60%	0,579	0,579
	2	NS C62300-96-900-0,7	96,0	900	0,16	75%	0,597	0,597
	3	S C62300-232,75-300-	232,8	300	0,19	60%	0,684	0,684
	4	S C62300-232,75-600-	232,8	600	0,19	50%	0,829	0,829
	5	NS C62300-374-300-0,	374,0	300	0,15	25%	0,837	0,837
Factor	-1	SUMA	1154,2	2550,0	0,9	270%		
Reordenar		Mitjana	230,84	510,00	0,17	54%		
0,5	1,5	Estimación	16,11	825	0,20	60%		Factor
		UNS C62300-16,109375-82	16,11	825	0,20	60%	0,889	0,889
								Factor 2

Iteración	3	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS C62300 -	1	C62300-218,71875-45	218,7	450	0,18	60%	0,579	0,579
	2	NS C62300-96-900-0,7	96,0	900	0,16	75%	0,597	0,597
	3	S C62300-232,75-300-	232,8	300	0,19	60%	0,684	0,684
	4	S C62300-232,75-600-	232,8	600	0,19	50%	0,829	0,829
	5	NS C62300-374-300-0,	374,0	300	0,15	25%	0,837	0,837
Factor	2	SUMA	1154,2	2550,0	0,9	270%		
NO reordenar		Mitjana	230,84	510,00	0,17	54%		
-0,25	-2,25	Estimación	552,95	38	0,12	60%		Factor
		UNS C62300-552,9453125-3	552,95	38	0,12	60%	0,474	0,474
								Factor -1

Iteración	4	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS C62300 -	1	NS C62300-410-100-0,	410,0	100	0,12	60%	0,474	0,474
	2	C62300-218,71875-45	218,7	450	0,18	60%	0,579	0,579
	3	NS C62300-96-900-0,7	96,0	900	0,16	75%	0,597	0,597
	4	S C62300-232,75-300-	232,8	300	0,19	60%	0,684	0,684
	5	S C62300-232,75-600-	232,8	600	0,19	50%	0,829	0,829
Factor	-1	SUMA	1190,2	2350,0	0,8	305%		
Reordenar		Mitjana	238,04	470,00	0,17	61%		
0,5	1,5	Estimación	245,98	275	0,14	60%		Factor
		UNS C62300-245,984375-27	245,98	275	0,14	60%	0,655	0,655
								Factor 2

Iteración	5	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS C62300	1	NS C62300-410-100-0	410,0	100	0,12	60%	0,474	0,474
	2	C62300-218,71875-45	218,7	450	0,18	60%	0,579	0,579
	3	NS C62300-96-900-0,7	96,0	900	0,16	75%	0,597	0,597
	4	S C62300-232,75-300-	232,8	300	0,19	60%	0,684	0,684
	5	C62300-245,984375-27	246,0	275	0,14	60%	0,655	0,655
Factor	2	SUMA	1203,5	2025,0	0,8	315%		
NO reordenar		Mitjana	240,69	405,00	0,16	63%		
-0,25	-2,25	Estimación	252,60	113	0,11	70%		Factor
		UNS C62300-252,6015625-11	252,60	113	0,11	70%	0,552	0,552
								-1

Iteración	6	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS C62300	1	NS C62300-410-100-0	410,0	100	0,12	60%	0,474	0,474
	2	C62300-252,6015625-11	252,6	113	0,11	70%	0,552	0,552
	3	C62300-218,71875-45	218,7	450	0,18	60%	0,579	0,579
	4	NS C62300-96-900-0,7	96,0	900	0,16	75%	0,597	0,597
	5	C62300-245,984375-27	246,0	275	0,14	60%	0,655	0,655
Factor	-1	SUMA	1223,3	1837,5	0,7	325%		
Reordenar		Mitjana	244,66	367,50	0,14	65%		
0,5	1,5	Estimación	242,68	506	0,15	50%		Factor
		UNS C62300-242,67578125-50	242,68	506	0,15	50%	0,867	0,867
								2

Iteración	7	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS C62300	1	NS C62300-410-100-0	410,0	100	0,12	60%	0,474	0,474
	2	C62300-252,6015625-11	252,6	113	0,11	70%	0,552	0,552
	3	C62300-218,71875-45	218,7	450	0,18	60%	0,579	0,579
	4	NS C62300-96-900-0,7	96,0	900	0,16	75%	0,597	0,597
	5	C62300-245,984375-27	246,0	275	0,14	60%	0,655	0,655
Factor	2	SUMA	1223,3	1837,5	0,7	325%		
NO reordenar		Mitjana	244,66	367,50	0,14	65%		
-0,25	-2,25	Estimación	247,64	159	0,13	50%		Factor
		UNS C62300-247,638671875-15	247,64	159	0,13	50%	0,641	0,641
								-1

Iteración	8	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS C62300 -	1	NS C62300-410-100-0	410,0	100	0,12	60%	0,474	0,474
	2	S2300-252,6015625-11	252,6	113	0,11	70%	0,552	0,552
	3	C62300-218,71875-45	218,7	450	0,18	60%	0,579	0,579
	4	NS C62300-96-900-0,7	96,0	900	0,16	75%	0,597	0,597
	5	S00-247,638671875-15	247,6	159	0,13	50%	0,641	0,641
Factor	-1	SUMA	1225,0	1721,9	0,7	315%		
Reordenar		Mitjana	244,99	344,38	0,14	63%		
0,5	1,5	Estimación	241,02	622	0,16	50%		Factor
		UNS C62300-241,021484375-62	241,02	622	0,16	50%	0,640	0,640
								Factor 2

Iteración	9	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS C62300 -	1	NS C62300-410-100-0	410,0	100	0,12	60%	0,474	0,47
	2	S2300-252,6015625-11	252,6	113	0,11	70%	0,552	0,55
	3	C62300-218,71875-45	218,7	450	0,18	60%	0,579	0,58
	4	NS C62300-96-900-0,7	96,0	900	0,16	75%	0,597	0,60
	5	S00-241,021484375-62	241,0	622	0,16	50%	0,640	0,64
Factor	2	SUMA	977,3	1562,5	0,6	265%		
NO reordenar		Mitjana	244,33	390,63	0,14	66%		
-0,25	-2,25	Estimación	-28,33	1634,38	0,22	40%		Factor
		UNS C62300-28,330078125-163	-28,33	1634,38	0,22	40%	0,759	0,76
								Factor -1

Iteración	10	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS C62300 -	1	NS C62300-410-100-0	410,0	100	0,12	60%	0,474	0,47
	2	S2300-252,6015625-11	252,6	113	0,11	70%	0,552	0,55
	3	C62300-218,71875-45	218,7	450	0,18	60%	0,579	0,58
	4	NS C62300-96-900-0,7	96,0	900	0,16	75%	0,597	0,60
	5	S00-241,021484375-62	241,0	622	0,16	50%	0,640	0,64
Factor	-1	SUMA	1218,3	2184,4	0,7	315%		
Reordenar		Mitjana	243,67	436,88	0,15	63%		
0,5	1,5	Estimación	247,64	159,38	0,13	50%		Factor
		UNS C62300-247,638671875-15	247,64	159,38	0,13	50%	0,458	0,458
								Factor 0,5

Iteración	11	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	NS C62300-410-100-0	410,0	100	0,12	60%	0,474	0,47
UNS C62300	2	62300-252,6015625-11	252,6	113	0,11	70%	0,552	0,55
-	3	C62300-218,71875-45	218,7	450	0,18	60%	0,579	0,58
	4	NS C62300-96-900-0,7	96,0	900	0,16	75%	0,597	0,60
	5	800-247,638671875-15	247,6	159	0,13	50%	0,458	0,46
<b>Factor</b>	<b>0,5</b>	SUMA	1225,0	1721,9	0,7	315%		
<b>NO reordenar</b>		Mitjana	244,99	344,38	0,14	63%		
0,125	-0,375	<b>Estimación</b>	<b>245,98</b>	<b>275,00</b>	<b>0,14</b>	<b>50%</b>		<b>Factor</b>
		<b>UNS C62300-245,984375-27</b>	<b>245,98</b>	<b>275,00</b>	<b>0,14</b>	<b>50%</b>	0,422	0,422
								<b>-1</b>

Iteración	12	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	C62300-245,984375-27	246,0	275	0,14	50%	0,422	0,42
UNS C62300	2	800-247,638671875-15	247,6	159	0,13	50%	0,458	0,46
-	3	NS C62300-410-100-0	410,0	100	0,12	60%	0,474	0,47
	4	62300-252,6015625-11	252,6	113	0,11	70%	0,552	0,55
	5	C62300-218,71875-45	218,7	450	0,18	60%	0,579	0,58
<b>Factor</b>	<b>-1</b>	SUMA	1374,9	1096,9	0,7	290%		
<b>Reordenar</b>		Mitjana	274,99	219,38	0,14	58%		
0,5	1,5	<b>Estimación</b>	<b>359,39</b>	<b>-126,56</b>	<b>0,07</b>	<b>40%</b>		<b>Factor</b>
		<b>UNS C62300-359,3935546875-12</b>	<b>359,39</b>	<b>-126,56</b>	<b>0,07</b>	<b>40%</b>	0,468	0,468
								<b>0,5</b>

Iteración	13	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material	1	C62300-245,984375-27	246,0	275	0,14	50%	0,422	0,42
UNS C62300	2	800-247,638671875-15	247,6	159	0,13	50%	0,458	0,46
-	3	NS C62300-410-100-0	410,0	100	0,12	60%	0,474	0,47
	4	62300-252,6015625-11	252,6	113	0,11	70%	0,552	0,55
	5	2300-359,3935546875	359,4	400	0,07	40%	0,468	0,47
<b>Factor</b>	<b>0,5</b>	SUMA	1515,6	1046,9	0,6	270%		
<b>NO reordenar</b>		Mitjana	303,12	209,38	0,11	54%		
0,125	-0,375	<b>Estimación</b>	<b>324,22</b>	<b>280,86</b>	<b>0,10</b>	<b>30%</b>		<b>Factor</b>
		<b>UNS C62300-324,224853515625-28</b>	<b>324,22</b>	<b>280,86</b>	<b>0,10</b>	<b>30%</b>	0,490	0,490
								<b>-1</b>

Iteración	14	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material	1	C62300-245,984375-27	246,0	275	0,14	50%	0,422	0,42
UNS C62300	2	300-247,638671875-15	247,6	159	0,13	50%	0,458	0,46
-	3	2300-359,3935546875	359,4	400	0,07	40%	0,468	0,47
	4	NS C62300-410-100-0	410,0	100	0,12	60%	0,474	0,47
	5	324,224853515625-28	324,2	281	0,10	30%	0,490	0,49
Factor	-1	SUMA	1587,2	1215,2	0,6	230%		
Reordenar		Mitjana	317,45	243,05	0,11	46%		
0,5	1,5	Estimación	307,28	186,33	0,13	30%		Factor
		UNS C62300-307,283447265625-18	307,28	186,33	0,13	30%	0,437	0,437
								0,5

## v. Bronce Aluminio UNS C63200 SIMPLEX B

Iteración	0	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material	1	UNS C62300-96-600-0,75	96,0	600,00	0,23	75%	0,660	0,6604
UNS C62300	2	UNS C62300-374-900-0,25	374,0	900,00	0,16	25%	0,741	0,7410
-	3	UNS C62300-232,8-300-0,75	232,8	300,00	0,19	75%	0,793	0,7926
	4	UNS C62300-345-300-0,5	345,0	300,00	0,15	50%	0,851	0,8511
	5	UNS C62300-116-600-0,5	116,0	600,00	0,20	50%	0,898	0,8981
Factor	-1	SUMA	1163,8	2700,0	0,9	275%		
Reordenar		Mitjana	232,76	540,00	0,19	55%		
0,5	1,5	Prova	407,90	450,00	0,17	63%		Factor
		UNS C62300-407,9-450-0,62	407,90	450,00	0,17	63%	0,563	0,5632
								0,5

Iteración	1	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material	1	UNS C62300-96-600-0,75	96,0	600,00	0,23	75%	0,660	0,6604
UNS C62300	2	UNS C62300-374-900-0,25	374,0	900,00	0,16	25%	0,741	0,7410
-	3	UNS C62300-232,8-300-0,75	232,8	300,00	0,19	75%	0,793	0,7926
	4	UNS C62300-345-300-0,5	345,0	300,00	0,15	50%	0,851	0,8511
	5	UNS C62300-407,9-450-0,62	407,9	450,00	0,17	63%	0,563	0,5632
Factor	0,5	SUMA	1455,7	2550,0	0,9	288%		
NO reordenar		Mitjana	291,14	510,00	0,18	58%		
0,125	-0,375	Estimación	334,93	487,50	0,17	59%		Factor
		UNS C62300-334,925-487,5-0,5	334,93	487,50	0,17	59%		-1

Las iteraciones 2, 3, 4, y 6 carecen de datos por un problema con el archivo. Afortunadamente fue posible recuperar los datos de la sexta y continuar con el algoritmo.

Iteración	6	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material UNS C62300 -	1	NS C62300-410-710,16-0,2	410,0	710,16	0,16	27%	0,466	0,4659
	2	NS C62300-407,9-450-0,62	407,9	450,00	0,12	63%	0,563	0,5632
	3	S C62300-334,925-487,5-0,	334,9	487,50	0,17	59%	0,621	0,6212
	4	S C62300-373,61-918,75-0,	373,6	918,75	0,13	36%	0,625	0,6246
	5	S C62300-338,41-764,06-0,	338,4	764,06	0,17	46%	0,634	0,6342
Factor		-1	SUMA	1864,8	3330,5	0,7	231%	
Reordenar			Mitjana	372,97	666,09	0,15	46%	
0,5		1,5	Estimación	424,81	519,15	0,12	47%	
		UNS C62300-424,8075-519,145-	424,81	519,15	0,12	47%	0,831	0,8313
								Factor 2

Iteración	7	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material UNS C62300 -	1	NS C62300-410-710,16-0,2	410,0	710,16	0,16	27%	0,466	0,4659
	2	NS C62300-407,9-450-0,62	407,9	450,00	0,12	63%	0,563	0,5632
	3	S C62300-334,925-487,5-0,	334,9	487,50	0,17	59%	0,621	0,6212
	4	S C62300-373,61-918,75-0,	373,6	918,75	0,13	36%	0,625	0,6246
	5	S C62300-338,41-764,06-0,	338,4	764,06	0,17	46%	0,634	0,6342
Factor		2	SUMA	1864,8	3330,5	0,7	231%	
NO reordenar			Mitjana	372,97	666,09	0,15	46%	
-0,25		-2,25	Estimación	295,21	886,52	0,20	45%	
		UNS C62300-295,21125-886,5175	295,21	886,52	0,20	45%	0,850	0,8498
								Factor -1

Iteración	8	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (µm)	F
Material UNS C62300 -	1	NS C62300-410-710,16-0,2	410,0	710,16	0,16	27%	0,466	0,4659
	2	NS C62300-407,9-450-0,62	407,9	450,00	0,12	63%	0,563	0,5632
	3	S C62300-334,925-487,5-0,	334,9	487,50	0,17	59%	0,621	0,6212
	4	S C62300-373,61-918,75-0,	373,6	918,75	0,15	36%	0,625	0,6246
	5	S C62300-338,41-764,06-0,	338,4	764,06	0,16	46%	0,634	0,6342
Factor		-1	SUMA	1864,8	3330,5	0,8	231%	
Reordenar			Mitjana	372,97	666,09	0,15	46%	
0,5		1,5	Estimación	424,81	519,15	0,14	47%	
		UNS C62300-424,8075-519,145-	424,81	519,15	0,14	47%	0,514	0,5139
								Factor 0,5

Iteración	9	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS C62300 -	1	NS C62300-410-710,16-0,2	410,0	710,16	0,16	27%	0,466	0,4659
	2	NS C62300-407,9-450-0,62	407,9	450,00	0,12	63%	0,563	0,5632
	3	S C62300-334,925-487,5-0,1	334,9	487,50	0,17	59%	0,621	0,6212
	4	S C62300-373,61-918,75-0,1	373,6	918,75	0,15	36%	0,625	0,6246
	5	C62300-424,8075-519,145-0,1	424,8	519,15	0,14	47%	0,514	0,5139
Factor 0,5		SUMA	1526,4	2566,4	0,6	1,8		
NO reordenar		Mitjana	381,6	641,6	0,1	0,5		
0,125 -0,375		Estimación	330,91	665,33	0,13	37%		Factor
		UNS C62300-330,908125-665,3325-0,1	330,91	665,33	0,13	37%	0,781	0,7814 -1

Iteración	10	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS C62300 -	1	NS C62300-410-710,16-0,2	410,0	710,16	0,16	27%	0,466	0,4659
	2	C62300-424,8075-519,145-0,1	424,8	519,15	0,14	47%	0,514	0,5139
	3	NS C62300-407,9-450-0,62	407,9	450,00	0,12	63%	0,563	0,5632
	4	S C62300-334,925-487,5-0,1	334,9	487,50	0,17	59%	0,621	0,6212
	5	S C62300-373,61-918,75-0,1	373,6	918,75	0,15	36%	0,625	0,6246
Factor -1		SUMA	1951,2	3085,6	0,7	232%		
Reordenar		Mitjana	390,25	617,11	0,15	46%		
0,5 1,5		Estimación	415,21	164,65	0,14	62%		Factor
		UNS C62300-415,20625-164,6525-0,1	415,21	164,65	0,14	62%	0,650	0,6497 2

Iteración	11	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS C62300 -	1	NS C62300-410-710,16-0,2	410,0	710,16	0,16	27%	0,466	0,4659
	2	C62300-424,8075-519,145-0,1	424,8	519,15	0,14	47%	0,514	0,5139
	3	NS C62300-407,9-450-0,62	407,9	450,00	0,12	63%	0,563	0,5632
	4	S C62300-334,925-487,5-0,1	334,9	487,50	0,17	59%	0,621	0,6212
	5	S C62300-373,61-918,75-0,1	373,6	918,75	0,15	36%	0,625	0,6246
Factor 2		SUMA	1951,2	3085,6	0,7	232%		
NO reordenar		Mitjana	390,25	617,11	0,15	46%		
-0,25 -2,25		Estimación	352,81	1295,80	0,15	23%		Factor
		UNS C62300-352,811875-1295,7981-0,1	352,81	1295,80	0,15	23%	0,757	0,7571 -1

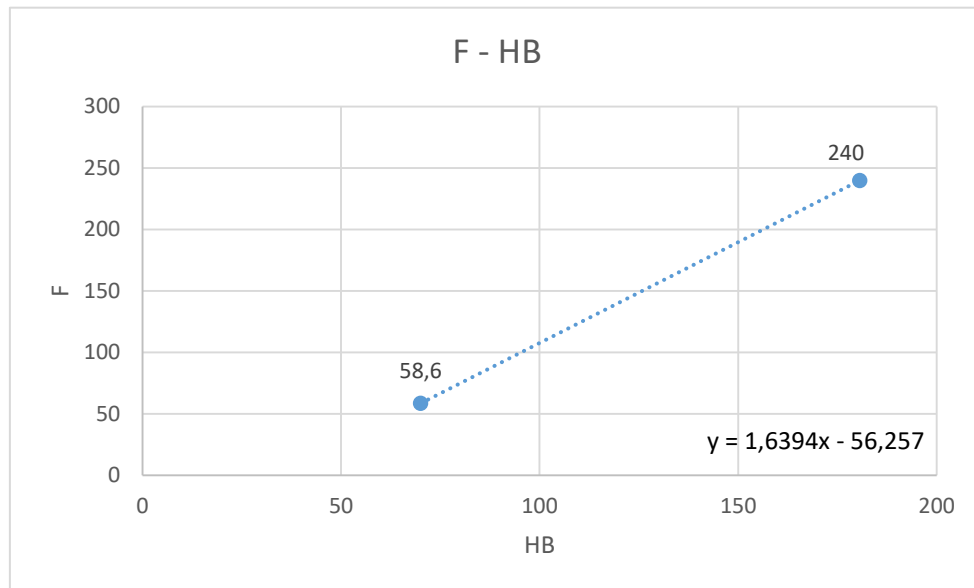


Iteración	12	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS C62300 -	1	NS C62300-410-710,16-0,2	410,0	710,16	0,16	27%	0,466	0,4659
	2	C62300-424,8075-519,145-0,14	424,8	519,15	0,14	47%	0,514	0,5139
	3	NS C62300-407,9-450-0,62	407,9	450,00	0,12	63%	0,563	0,5632
	4	S C62300-334,925-487,5-0,17	334,9	487,50	0,17	59%	0,621	0,6212
	5	S C62300-373,61-918,75-0,15	373,6	918,75	0,15	36%	0,625	0,6246
Factor		-1	SUMA	1951,2	3085,6	0,7	232%	
Reordenar			Mitjana	390,25	617,11	0,15	46%	
0,5		1,5	Estimación	415,21	164,65	0,14	62%	
			UNS C62300-415,20625-164,6525	415,21	164,65	0,14	62%	0,564
								0,5644
								Factor
								2

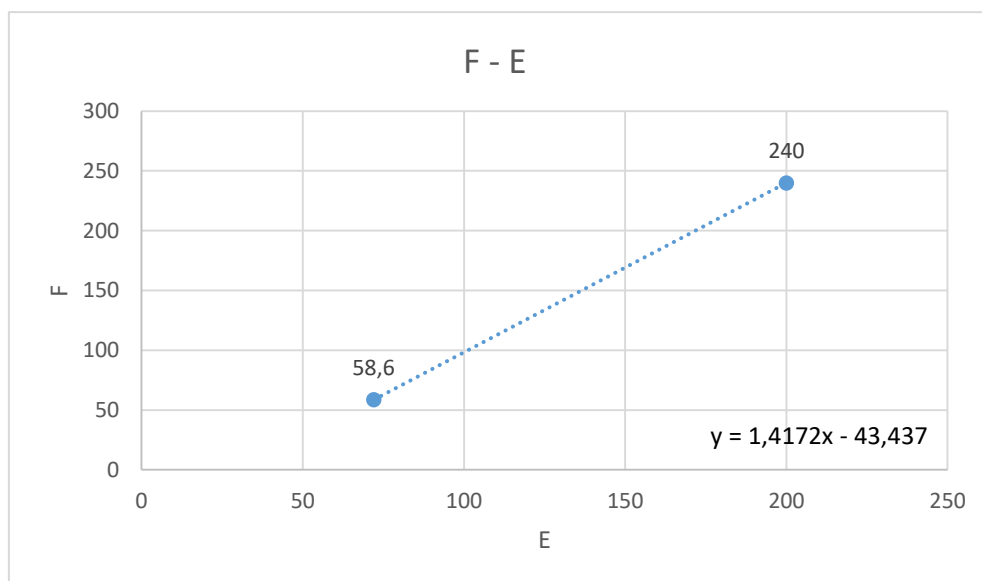
Iteración	13	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS C62300 -	1	NS C62300-410-710,16-0,2	410,0	710,16	0,16	27%	0,466	0,4659
	2	C62300-424,8075-519,145-0,14	424,8	519,15	0,14	47%	0,514	0,5139
	3	NS C62300-407,9-450-0,62	407,9	450,00	0,12	63%	0,563	0,5632
	4	S C62300-334,925-487,5-0,17	334,9	487,50	0,17	59%	0,621	0,6212
	5	UNS C62300-410-650-0,619	410,0	650,00	0,14	62%	0,564	0,5644
Factor		2	SUMA	1987,6	2816,8	0,7	258%	
NO reordenar			Mitjana	397,53	563,36	0,15	52%	
-0,25		-2,25	Estimación	425,59	758,30	0,14	75%	
			UNS C62300-425,591875-758,29875	425,59	758,30	0,14	75%	0,549
								0,5494
								Factor
								-1

Iteración	14	Código material	F (N)	Va (mm/min)	b (mm)	Amplitud vibración	Ra (μm)	F
Material UNS C62300 -	1	NS C62300-410-710,16-0,2	410,0	710,16	0,16	27%	0,466	0,4659
	2	C62300-424,8075-519,145-0,14	424,8	519,15	0,14	47%	0,514	0,5139
	3	S C62300-410-758,29875-0,14	410,0	758,30	0,14	75%	0,549	0,5494
	4	NS C62300-407,9-450-0,62	407,9	450,00	0,12	63%	0,563	0,5632
	5	UNS C62300-410-650-0,619	410,0	650,00	0,14	62%	0,564	0,5644
Factor		-1	SUMA	2062,7	3087,6	0,7	273%	
Reordenar			Mitjana	412,54	617,52	0,14	55%	
0,5		1,5	Estimación	416,35	568,80	0,13	44%	
			UNS C62300-416,35375-568,801875	416,35	568,80	0,13	44%	0,458
								0,4578
								Factor
								0,5

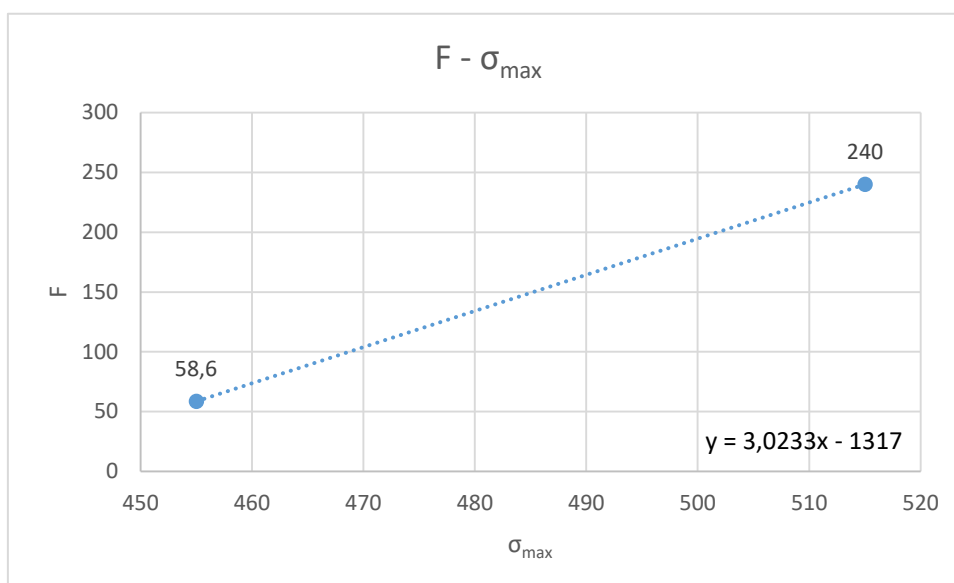
## D. Gráficos de estimación de parámetros para el bronce UNS C62300



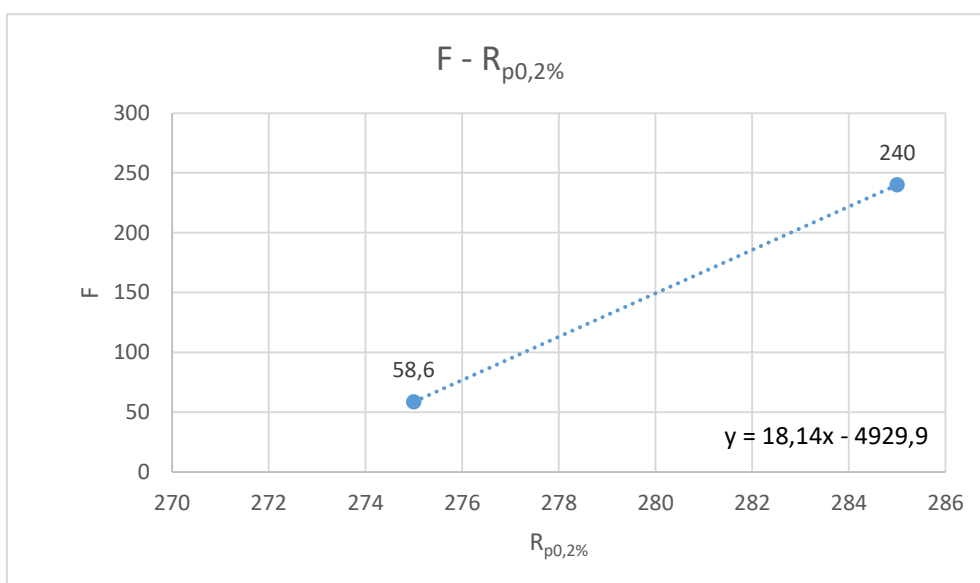
Gráfica 1: Fuerza - Dureza Brinell. Estimación de parámetros para el bronce UNS C62300



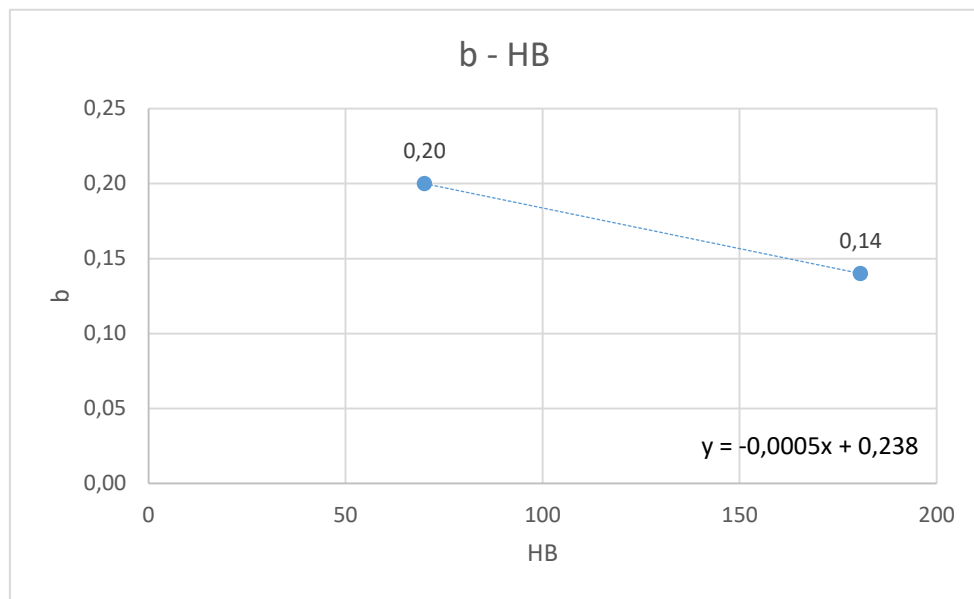
Gráfica 2: Fuerza - Módulo de Young. Estimación de parámetros para el bronce UNS C62300



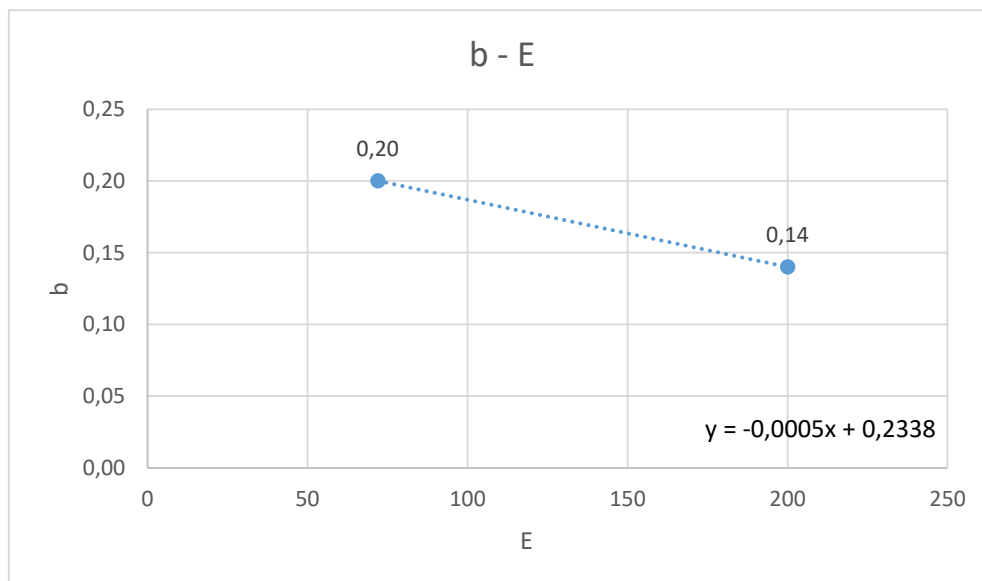
Gráfica 3: Fuerza - Tensión máxima a rotura. Estimación de parámetros para el bronce UNS C62300



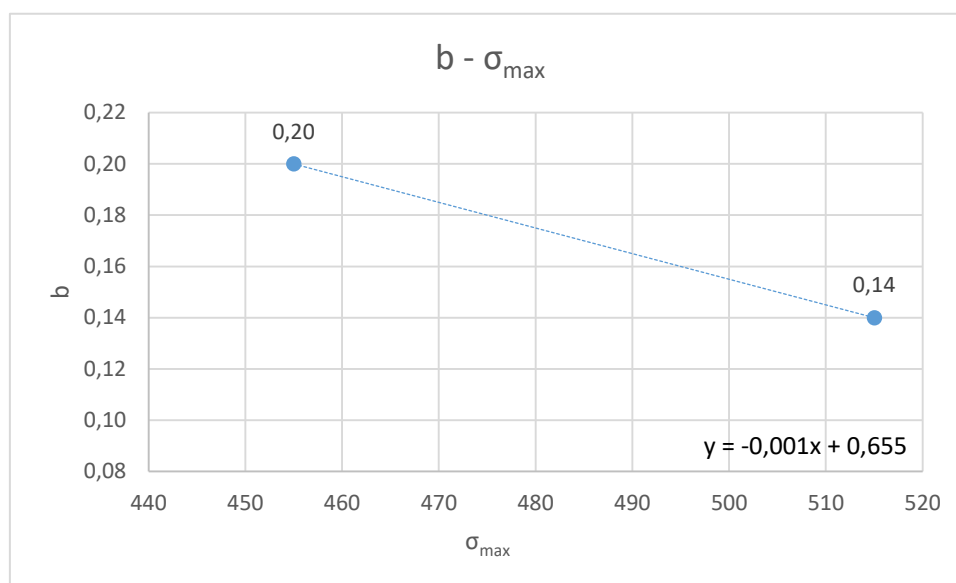
Gráfica 4: Fuerza - Límite elástico. Estimación de parámetros para el bronce UNS C62300



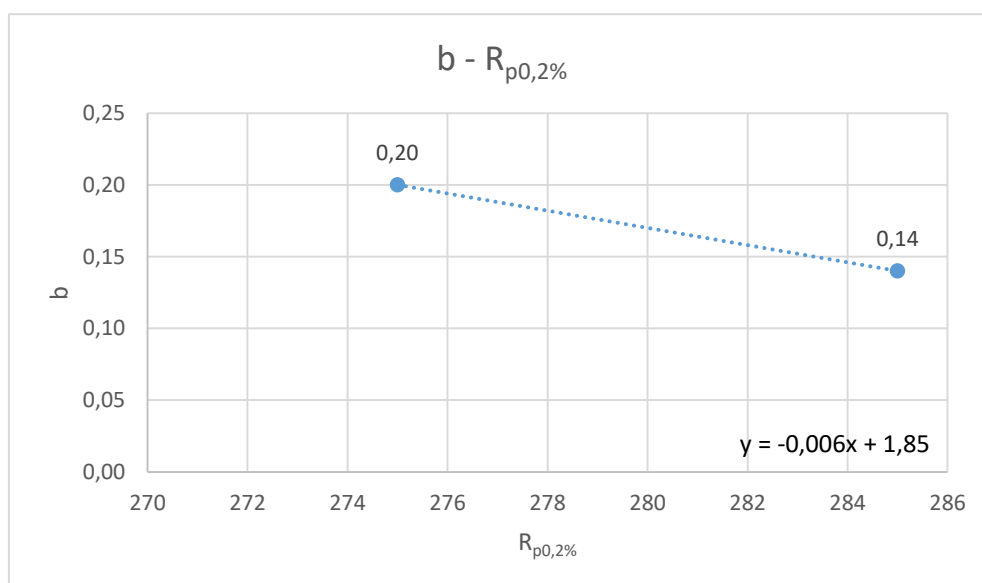
Gráfica 5: Paso lateral – Dureza Brinell. Estimación de parámetros para el bronce UNS C62300



Gráfica 6: Paso lateral – Módulo de Young. Estimación de parámetros para el bronce UNS C62300



Gràfica 7: Paso lateral – Tensión máxima a rotura. Estimación de parámetros para el bronce UNS C62300



Gràfica 8: Paso lateral – Límite elástico. Estimación de parámetros para el bronce UNS C62300

## **E. Análisis de costes.**

Acero UNS G10380			
Coste Material		Coste	5,00 €/kg
		Peso	0,905 kg
Coste Máquina CNC			975,39 €
Coste de máquina	60 €/h		
Tiempo Fresado Desbaste	119 s		
Tiempo Fresado Acabado	95 s		
Tiempo preparación equipo	600 s		
Bruñido SIMPLEX A	1135 s		
Bruñido SIMPLEX B	0 s		
Bruñido SIMPLEX C	0		
Toma de datos	4320 s		
Tiempo improductivo	5225 s		
Coste Ensayos Dureza HV			20,06 €
Coste de máquina	15 €/h		
Tiempo Uso durómetro	1215 s		
Tiempo improductivo	3600 s		
Coste Ensayos Dureza HB			n/a
Coste de máquina	n/a		
Tiempo Uso Durómetro	n/a		
Coste de máquina, Microscopio	n/a		
Tiempo Uso Microscopio	n/a		
Tiempo Improductivo	n/a		
Coste Herramientas			30 €
Coste cuchilla	10 €		
Cantidad de cuchillas	3 €		
Coste Mano de obra			895,01 €
Coste Ingeniero	30,51 €/h		
Coste Operario	20,36 €/h		
Horas	17,59 h		
Subtotal			1.924,99 €

COSTES DOCUMENTACIÓN MEMORIA		21.052 €
Planificación ensayos	110 h	
Tratamiento de datos obtenido:	335 h	
Redacción de documentación	245 h	

Aluminio UNS A92017			
Coste Material		Coste	17,00 €/kg
		Peso	0,392 kg
Coste Máquina			251,88 €
Coste de máquina	60 €/h		
Tiempo Fresado Desbaste	57 s		
Tiempo Fresado Acabado	71 s		
Tiempo preparación equipo	600 s		
Bruñido SIMPLEX A	798 s		
Bruñido SIMPLEX B	1256 s		
Bruñido SIMPLEX C	0		
Toma de datos	5130 s		
Tiempo improductivo	7200 s		
Coste Ensayos Dureza HV			61,50 €
Coste de máquina	15 €/h		
Tiempo Uso durómetro	3960 s		
Tiempo improductivo	10800 s		
Coste Ensayos Dureza HB			15,21 €
Coste de máquina	15 €/h		
Tiempo Uso Durómetro	450 s		
Coste de máquina, Microscopio	10 €/h		
Tiempo Uso Microscopio	2100 s		
Tiempo Improductivo	2700 s		
Coste Herramientas			75 €
Coste cuchilla	15 €		
Cantidad de cuchillas	5		
Coste Mano de obra			422,12 €
Coste Ingeniero	31 €/h		
Coste Operario	20 €/h		
Horas	8,30 h		
Subtotal			832,37 €

COSTES GENERALES OFICINA		2.356 €
Agua	43,23 €/mes	
Luz	45,86 €/mes	
Alquiler	500 €/mes	
Tiempo total	4 meses	

Bronce UNS C62300			
Coste Material		Coste	6,80 €/kg
		Peso	0,974 kg
Coste Máquina			602,68 €
Coste de máquina	60 €/h		
Tiempo Fresado Desbaste	n/a		
Tiempo Fresado Acabado	53 s		
Tiempo preparación equipo	600 s		
Bruñido SIMPLEX A	2490 s		
Bruñido SIMPLEX B	1044 s		
Bruñido SIMPLEX C	924 s		
Toma de datos	20250 s		
Tiempo improductivo	10800 s		
Coste Ensayos Dureza HV			31,50 €
Coste de máquina	15 €/h		
Tiempo Uso durómetro	3960 s		
Tiempo improductivo	3600 s		
Coste Ensayos Dureza HB			11,35 €
Coste de máquina	15 €/h		
Tiempo Uso Durómetro	225 s		
Coste de máquina, Microscopio	10 €/h		
Tiempo Uso Microscopio	1050 s		
Tiempo Improductivo	2700 s		
Coste Herramientas			65 €
Coste cuchilla	13 €		
Cantidad de cuchillas	5		
Coste Mano de obra			617,80 €
Coste Ingeniero	31 €/h		
Coste Operario	20 €/h		
Horas	12,14 h		
Subtotal			1.334,96 €

Total	27.500,58 €
-------	-------------

Tabla 1: Análisis de costes detallado





## **F. Resumen de Normativas y Leyes**

Norma UNE 7-423-84, en lo que se refiere al ensayo de dureza Vickers.

Norma UNE-EN ISO 6506-1:2006, en lo que se refiere al ensayo de dureza Brinell.

Ley 26/2007 de Responsabilidad Medioambiental, en lo que se refiere a la gestión de residuos.

## G. Tablas de parámetros de ensayo dureza Brinell

MATERIAL	HBW	$K \left( \frac{kg}{mm^2} \right)$
Aceros		30
Fundiciones <sup>(1)</sup>	< 140	10
	≥ 140	30
Cobre y sus aleaciones	< 35	5
	35 ÷ 200	10
	> 200	30
Metales ligeros y sus aleaciones	< 35	1,25 - 2,5
	35 ÷ 80	5 - 10 - 15
	> 80	10 - 15
Plomo y estaño		1 - 1,25

Tabla 2: Valores de K según material **(11)**

Símbolo de dureza	Diámetro bola (mm)	K $\left(\frac{kg}{mm^2}\right)$	Valor nominal de fuerza aplicada (N)
HBW 10/3000	10,0	30	29421
HBW 10/1500	10,0	15	14710
HBW 10/1000	10,0	10	9807
HBW 10/500	10,0	5	4903
HBW 10/250	10,0	2,5	2452
HBW 10/125	10,0	1,25	1226
HBW 10/100	10,0	1	980,7
HBW 5/750	5,0	30	7355
HBW 5/250	5,0	10	2452
HBW 5/125	5,0	5	1226
HBW 5/62,5	5,0	2,5	612,9
HBW 5/31,25	5,0	1,25	306,5
HBW 5/25	5,0	1	245,2
HBW 2,5/187,5	2,5	30	1839
HBW 2,5/62,5	2,5	10	612,9
HBW 2,5/31,25	2,5	5	306,5
HBW 2,5/15,625	2,5	2,5	153,2
HBW 2,5/7,8125	2,5	1,25	76,61
HBW 2,5/6,25	2,5	1	61,29
HBW 2/120	2,0	30	1177
HBW 2/40	2,0	10	392,30
HBW 2/20	2,0	5	196,10
HBW 2/10	2,0	2,5	98,07
HBW 2/5	2,0	1,25	49,03
HBW 2/4	2,0	1	39,23
HBW 1/30	1,0	30	294,20
HBW 1/10	1,0	10	98,07
HBW 1/5	1,0	5	49,03
HBW 1/2,5	1,0	2,5	24,52
HBW 1/1,25	1,0	1,25	12,26
HBW 1/1	1,0	1	9,807

Tabla 3: Valores nominales de F, D y K (11)